PROGRAMME SITERRE
-
Procédé de construction de Sols à partir de matériaux Innovants en substitution à la TERRE végétale et aux granulats de carrière

Rapport final

remis le 14 décembre 2015







Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par le consortium formé pour le projet SITERRE (Plante & Cité, Valterra, Rittmo Agroenvironnement, ACTeon, Luc Durand, IFSTTAR, BRGM, Université de Lorraine-GISFI, Agrocampus Ouest-INHP, coordonné par Plante & Cité – Olivier DAMAS (Contrat n°0906C0063).

Coordination technique : Fabienne MULLER, Service Prévention et Gestion des Déchets, Direction Consommation Durable et Déchets ADEME (Angers).

L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, de l'énergie, du Développement durable et de la Mer et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en oeuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

www.ademe.fr

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Remerciements :

Le projet SITERRE a été principalement financé par l'ADEME. Les auteurs et partenaires du consortium tiennent à remercier l'ADEME pour son soutien financier, et sa confiance tout au long du projet.

Ce projet est le fruit d'un partenariat entre douze organismes (partenaires et sous-traitants). La liste complète de ces organismes et des personnes ayant contribuées au projet SITERRE est présentée en page suivante.
Ce projet a fait l'objet d'une thèse (Université de Lorraine), entreprise par Sarah Rokia.
Les auteurs tiennent à adresser à tous ces partenaires leurs plus chaleureux remerciements.

Une instance d'information et de consultation des acteurs opérationnels a été créée au sein du programme, appelée Comité expert. Nous tenons à remercier les participants à ce comité pour leur contribution au projet :

- Fabienne Muller et Laurent CHATEAU (ADEME),
- Sandrine LEMENAGER (MAAF, bureau des sols et de l'eau),
- Benoît LAMBREY (représentant de l'UNEP, les entreprises du paysage),
- Jean-Pierre GUENEAU (président de Hortis, les responsables d'espaces nature en ville),
- François NOLD (direction des espaces verts et de l'environnement, ville de Paris)
- Denis BIGOT (direction des espaces verts, ville d'Orléans),
- Christophe GROSS (service des espaces verts, Grand Nancy),
- Jean-Christophe LOUVET (cluster Novabuild)
- Eric AMOS (Hepia-Genève et Plante & Cité Suisse),
- Jean-Pierre ROSSIGNOL (Conseil scientifique de Plante & Cité).

Pour l'accueil de ce Comité expert, ainsi que pour la tenue d'autres ateliers et réunions, nous souhaitons remercier l'aide logistique des villes et métropoles de Paris, Nancy, Strasbourg, ainsi que celle du BRGM.

Contact projet : Olivier DAMAS, Plante & Cité, olivier.damas@plante-et-cite.fr

Liste des personnes du programme ADEME-SITERRE

Financeur, Ademe :

Fabienne Muller, Christine Chevaillier, Laurent Chateau, Françoise Duret

Partenaires du consortium :

Plante & Cité (coordination)

Olivier Damas, Anaïs Coulon, Hélène Veillon

ACTeon

Pierre de France, Benoît Grandmougin, Ylang Chevaleraud, Florimond Brun

Agrocampus Ouest

Patrice Cannavo, Laure Vidal-Beaudet, Gilles Galopin, Yvette Barraud-Roussel, Sylviane Delepine-Bourgeois, Claudie Mazzega, Henri Carpentier, Rémi Gardet, Christine Durand

BRGM

Philippe Bataillard, Aline Coftier, Stéfan Colombano, Samuel Coussy

Ifsttar

Michel Legret, Béatrice Béchet, Liliane Jean-Soro, Deniz Yilmaz, Dominique Demare et Pierre-Emmanuel Peyneau, Erwann Rayssac, Laëtitia Pineau, Nadège Caubrière et Céline Ragoin, Dominique Renoux

Luc Durand

Jean-Christophe Louvet, Jean-Luc Durand, Julien Subileau, Patrick Durand, Benoit Leroueille, Marlène Texeira Da Silva, Anthony Cochard, Jean Sechet

Rittmo

Pascale Chenon, Mohammed Benbrahim, Sylvain Pluchon, Myriam Sadir, Jessica Haas, Audrey Muller, Elisabeth Rullier

Université de Lorraine/Laboratoire Sol et Environnement/Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Friches Industrielles

Christophe Schwartz, Geoffroy Séré, Sarah Rokia (thésarde), Lucas Charrois, Jean-Claude Bégin, Rémi Baldo, Mélanie Malacarne

Valterra Dépollution Réhabilitation

Sophie Guimont, Jean-Christophe Renat, Lucas Gossiaux, Marc Weiler

Vox Gaïa

Pascale Chenon

Sous-traitants :

Insavalor

Mohamed Abdelghafour, Karim Lounis

Microhumus

Gaylord Machinet, Maxime Maire, Geneviève Villemin

Université de Lorraine/Laboratoire de Chimie Physique et Microbiologie pour l'Environnement

Christian Ruby, Martine Mallet, Mustapha Abdelmoula

SOMMAIRE

I. Présentation du programme SITERRE ... 1
I.1. Contexte et objectifs du projet ... 1
I.2. Contenu et structuration du projet ... 1
II. Liste et typologie des matériaux potentiels, et choix des matériaux modèles du programme (=Tâche 1) 2
II.1. Une conception et construction de sol guidée par l'usage ... 2
II.1.a. Définition des paramètres de fonctionnalités des sols construits ... 2
II.1.b. Définition d'un profil de sol en fonction de l'usage ... 3
II.1.c. Définition des propriétés idéales de chaque horizon ... 3
II.2. Les matériaux de substitution potentiels ... 5
Le Catalogue Européen des Déchets comme référentiel de travail ... 6
II.2.a. Grille de critères en vue de la sélection des matériaux ... 6
II.2.b. Les matériaux de substitution présentant le plus de potentiel sur le plan national ... 11
II.2.c. Constitution d'une « rudothèque » sur la durée du programme SITERRE ... 13
III. Caractérisation individuelle des matériaux modèles (=Tâche 2) ... 14
III.1. Echantillonnage sur le site de la « rudothèque » ... 14
III.2. Matériels et méthodes ... 14
III.2.a. Propriétés mécaniques ... 14
III.2.b. Composition chimique ... 16
III.2.c. Caractérisation minéralogique ... 16
III.2.d. Propriétés agronomiques ... 18
III.2.e. Evaluation environnementale (tests de lixiviation, écotoxicologiques et pathogènes) ... 22
III.3. Résultats et discussion ... 25
III.3.a. Propriétés mécaniques ... 25
III.3.b. Composition chimique ... 31
III.3.c. Caractérisation minéralogique ... 38
III.3.d. Propriétés agronomiques ... 42
III.3.e. Evaluation environnementale (tests de lixiviation, écotoxicologiques et pathogènes) ... 59
IV. Formulation des mélanges (=Tâche 3) ... 68
IV.1. Modèle de formulation et d'estimation des propriétés des mélanges ... 68
IV.1.a. Méthode de sélection des mélanges ... 68
IV.1.b. Procédure de mélange des matériaux ... 69
IV.1.c. Méthodes de caractérisation des mélanges et modélisation de leurs propriétés ... 69
IV.2. Courbes doses-réponses et modélisation ... 70
IV.2.a. Propriétés physico-chimiques des mélanges ... 70
IV.2.b. Courbes doses-réponses issues de l'addition d'un matériau à un autre ... 72
IV.2.c. Modélisation des propriétés des mélanges ... 77
IV.3. Choix et réalisation des 6 mélanges modèles ... 80
IV.3.a. Choix des mélanges modèles ... 80
IV.3.b. Réalisation des mélanges modèles ... 80
V. Caractérisation des 6 mélanges modèles de matériaux (=Tâche 3) ... 83
V.1. Caractérisation mécanique ... 83
V.1.a. Matériels et méthodes ... 83
V.1.b. Résultats des essais ... 84
V.2. Caractérisation chimique et calculs géochimiques ... 90
V.2.a. Analyses totales ... 90
V.2.b. Tests de lixiviation ... 92
V.2.c. Essai de percolation en colonne ascendante ... 94
V.2.d. Calculs géochimiques ... 102
V.3. Caractérisation agronomique ... 104
V.3.a. Matériel et méthodes ... 104
V.3.b. Résultats ... 105
V.4. Caractérisation écotoxique et évaluation des agents pathogènes ... 113
V.4.a. Rappel des méthodologies ... 113
V.4.b. Résultats des essais sur les organismes terrestres ... 115
V.4.c. Résultats des essais sur les organismes aquatiques ... 121
V.4.d. Résultats des essais de génotoxicité ... 125
V.4.e. Conclusion sur l'écotoxicité des mélanges étudiés ... 127
V.4.f. Evaluation des agents pathogènes ... 129
VI. Evolution des Technosols construits (=Tâche 4) ... 131
VI.1. Evolution des matériaux en mélange en conditions contrôlées ... 131
VI.1.a. Processus d'agrégation : caractérisation des agrégats ... 131

VI.1.b. Processus d'altération chimique et réactivité des matériaux : évolution du statut du fer lors d'essais de vieillissement accéléré 135
VI.2. Evolution de l'état et flux depuis les sols construits : validation en vraie grandeur du procédé de construction de sol 138
VI.2.a. Description des dispositifs 138
VI.2.b. Etat du compartiment Sol 139
VI.2.c. Etat du compartiment Plante 152
VI.2.d. Flux = état du compartiment Eau 154
VI.3. Impacts sur les composantes de l'environnement 159
VI.3.a. Comparaison avec les limites de qualité des eaux 159
VI.3.b. Exploitation des caractérisations écotoxicologiques 161
VI.4. Fonctionnement des sols construits 165
VI.4.a. Circulation et rétention de l'eau 165
VI.4.b. Cycle biogéochimique des éléments 165
VI.4.c. Stabilité physique 165
VI.4.d. Support des activités humaines (support d'infrastructures de voierie) 166
VI.4.e. Support de végétation 166
VI.5. Pédogenèse précoce des Technosols construits 167
VI.5.a. Description des processus d'évolution pédogénétique 167
VI.5.b. Couplage des processus 171
VI.5.c. Prospective sur le fonctionnement à long terme des sols construits 175
VI.6. Discussion sur les services rendus par les sols construits 175
VII. Vers l'élaboration de la filière par une approche et méthode multicritères (=Tâche 5) 178
VII.1. Analyse réglementaire 178
VII.1.a. Analyse réglementaire de la réglementation actuelle 178
VII.1.b. Groupes d'experts 182
VII.2. Analyse technico-économique 183
VII.2.a. Les hypothèses retenues pour l'estimation de coûts de la filière SITERRE et de la filière traditionnelle. 183
VII.2.b. Les estimations des cas d'études 185
VII.2.c. Les résultats 186
VII.2.d. Discussion des résultats et généralisation à partir des cas d'étude 189
VII.3. Analyse sociétale : l'acceptabilité par les différents publics et utilisateurs 190
VII.3.a. Eléments de définition 190
VII.3.b. Revue bibliographique : double zoom acceptabilité et perceptions des boues de STEP en épandage et pour les déchets verts 191
VII.3.c. Les consultations et analyses réalisées à partir d'ateliers grand public et acteurs locaux ... 199
VII.3.d. Analyse des perceptions du grand public issue des focus group 199
VII.3.e. Préconisations et conditions pour l'utilisation des sols construits en ville 206
VII.4. Evaluation sanitaire et environnementale 206
VII.4.a. Bases de données pour la définition de référentiels de qualité des sols et eaux souterraines (fonds géochimiques et hydrogéochimiques nationaux et locaux) 206
VII.4.b. Evaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS) sur les mélanges SITERRE 208
VII.4.c. Conclusion relatives aux évaluations des risques sanitaires 224
VII.5. Analyse et proposition d'un outil d'analyse multicritères 225
VIII. Références bibliographiques 227
IX. Liste des communications et articles dans le cadre du programme SITERRE (jusque novembre 2015) 230

FIGURES

Figure 1 : Profils fonctionnels des cinq usages modèles de sols en ville définis pour assurer les fonctions de support, d'alimentation en eau et de filtre et échange 2
Figure 2 : Profils de sol des usages "Square et parc urbain" et "Arbre d'alignement" 3
Figure 3 : Processus de sélection matériaux potentiels - exemple de la démarche nationale 5
Figure 4 : Exemple de matériau du 1er groupe : briques, tuiles et céramiques 9
Figure 5 : Exemple de matériau du 2ème groupe : terres d'excavation 10
Figure 6 : Exemple de matériau du 3ème groupe : déchets de sylviculture, jardins municipaux, tissus végétaux 10
Figure 7 : Exemple de matériau du 4ème groupe : boues de dragage 10
Figure 8 : Planche photo des 11 matériaux modèles 13
Figure 9 : La « rudothèque » SITERRE en juin 2011 13
Figure 10 : Essais Proctor et IPI sur les sous-produits de l'industrie papetière 15
Figure 11 : Essai de résistance au gel/dégel, échantillon gelé au cours d'un cycle 16
Figure 12 : Dispositif de mesure de densité apparente sur du ballast 19
Figure 13 : Mesure de la densité réelle au pycnomètre sur les sous-produits papetiers à l'eau 20
Figure 14 : Mesure des humidités caractéristiques à l'aide de presses à membrane 20
Figure 15 : Mesure de la conductivité hydraulique : (a) mise à saturation des échantillons (b) mesure de la conductivité à l'aide de l'infiltromètre à minidisque 21
Figure 16 : Analyses granulométriques 26
Figure 17 : Bilan comparatif des essais Proctor sur les terres excavées, les boues de STEP et les sous produits de l'industrie papetière 27
Figure 18 : Courbes Proctor et IPI des terres excavées 27
Figure 19 : Courbes Proctor et IPI des sous produits de l'industrie papetière 27
Figure 20 : Courbes Proctor et IPI des boues de STEP 28
Figure 21 : Capacités de neutralisation acido-basique des matériaux 41
Figure 22 : Clichés MET des boues de STEP 45
Figure 23 : Clichés MET des sous-produits papetiers 46
Figure 24 : Clichés MET des déchets verts 47
Figure 25 : Clichés MET du compost 48
Figure 26 : Clichés MET des déchets de nettoyage des rues 49
Figure 27 : Evaluation qualitative des réserves en eau utile des matériaux étudiés 51
Figure 28 : Répartition granulométrique des matériaux 52
Figure 29 : Interprétation des niveaux de phosphore disponible dans les matériaux étudiés 56
Figure 30 : Interprétation des niveaux de CEC dans les matériaux étudiés 57
Figure 31 : Pourcentage d'émergence de l'orge et du cresson pour les différents matériaux étudiés (norme XPU44-167 modifiée) 62
Figure 32 : Biomasse (exprimée en %) de l'orge et du cresson pour les différents matériaux étudiés (norme XPU44-167 modifiée) 63
Figure 33 : Pourcentage d'évitement en fonction du pourcentage de matériau apporté au substrat de référence 63
Figure 34 : Pourcentage d'inhibition de croissance (nombre de frondes après 7 jours de contact) des lentilles d'eau en fonction du pourcentage d'apport du lixiviat des matériaux étudiés à la solution nutritive témoin. La ligne en pointillé représente un taux d'inhibition de 25% 64
Figure 35 : Pourcentage d'immobilisation des daphnies en fonction du pourcentage 65
Figure 36 : Résultats de l'essai de toxicité aiguë réalisé sur éluat 66
Figure 37 : Démarche de formulation de matériaux pour la construction de sols 68
Figure 38 : Caractéristiques physico-chimiques des 75 mélanges de matériaux 71
Figure 39 : Régressions linéaires doses-réponses pour Ctot (a, b et c) et pour POlsen (d, e, f), respectivement pour des mélanges binaires et ternaires 73
Figure 40 : Régressions linéaires doses-réponses pour la CEC (a, b et c) et pour le pH (d, e, f), respectivement pour des mélanges binaires et ternaires 75
Figure 41 : Régressions linéaires doses-réponses pour la capacité de rétention en eau à -10 kPa (TE) (a, b et c) et pour la masse volumique apparente (MVA) (d, e, f), respectivement pour des mélanges binaires et ternaires de type « déchets minéral/déchets organique » (M/O) (a et d) ; des mélanges binaires de type « déchets terreux/déchets organiques » (T / O) (b et e) et des mélanges binaires de type « déchet terreux/déchets minéraux » (T/ M) (c et f) 76
Figure 42 : Régressions linéaires correspondant à l'étape de validation : comparaison entre les valeurs modélisées (mod.) et les valeurs obtenues au laboratoire (exp.) pour les paramètres Ctot (a), POlsen (b) , CEC (c), pH (d), la teneur en eau à -10 kPa (e) et la masse volumique apparente (f), les coefficients de corrélation obtenus pour chaque paramètre Ctot, POlsen, CEC, pH, TE et MVA sont de respectivement 0,6 ; 0,72 ; 0,88 ; 0,1 ; 0,93 et 0,95 79
Figure 43 : Vue extérieure et intérieure du malaxeur 81

Figure 44 : Vue du pèse palette et de la pelle mécanique 81
Figure 45 : Vue du mélange BA-DR-CO 82
Figure 46 : Vue du mélange BA-SP 82
Figure 47 : Vue du mélange TA-BA-BS 82
Figure 48 : Vue du mélange TA-BE-DV 82
Figure 49 : Analyse granulométrique des mélanges (x5) 85
Figure 50 : Courbes Proctor des mélanges (x6) 86
Figure 51 : Détail des courbes Proctor et IPI (*ρ : masse volumique des grains)* 89
Figure 52 : Vue du mélange BA-DR-CO 105
Figure 53 : Vue du mélange BR-CO 105
Figure 54 : Vue du mélange TA-CO 106
Figure 55 : Granulométrie sur frais du mélange BA-DR-CO 106
Figure 56 : Granulométrie sur frais du mélange BR-CO 107
Figure 57 : Granulométrie sur frais du mélange TA-CO 107
Figure 58 : Répartition des fractions granulo-densimétriques après désagrégation contrôlée 108
Figure 59 : Images en MET de la fraction 200 – 2000 µm du mélange BA-DR-CO 108
Figure 60 : Images en MET de la fraction 200 – 2000 µm du mélange BR-CO 109
Figure 61 : Images en MET de la fraction 200 – 2000 µm du mélange BA-DR-CO 109
Figure 62 : Images en MET de la fraction < 50 µm du mélange BA-DR-CO 110
Figure 63 : Images en MET de la fraction < 50 µm du mélange BR-CO 110
Figure 64 : Image en MET de la fraction < 50 µm du mélange TA-CO 111
Figure 65 : Pourcentage d'inhibition sur la germination et la croissance de l'orge 115
Figure 66 : Pourcentage d'inhibition sur la germination et la croissance du cresson 116
Figure 67 : Mélanges mis en pot et exemple de semis d'orge avant le lancement de l'essai 117
Figure 68 : Pourcentage d'évitement des vers de terre sur les différents mélanges 118
Figure 69 : Pourcentage de mortalité des vers de terre sur les mélanges testés à 100 % 118
Figure 70 : Pourcentage de mélange causant 100% de mortalité 119
Figure 71 : Pourcentage de mortalité en fonction de la dilution du mélange dans un substrat artificiel 119
Figure 72 : Croissance des orges après 21 jours de culture 120
Figure 73 : Résultats d'écotoxicité obtenus sur les indicateurs terrestres 121
Figure 74 : Pourcentage d'inhibition de la croissance des algues dans 90% de lixiviat de chaque mélange testé 122
Figure 75 : Pourcentage d'inhibition de la croissance des algues en fonction 122
Figure 76 : Pourcentage d'inhibition par rapport au Témoin du nombre 123
Figure 77 : Pourcentage d'inhibition par rapport au Témoin de la surface 123
Figure 78 : Pourcentage d'immobilisation des Daphnies dans 90% de lixiviat de chaque mélange testé 124
Figure 79 : Pourcentage d'immobilisation des Daphnies en fonction de la dilution du lixiviat des mélanges 124
Figure 80 : Résultats d'écotoxicité obtenus sur les indicateurs aquatiques 125
Figure 81 : nombre de cellules en division dans les racines des graines 126
Figure 82 : nombre de cellules en division dans les racines des graines 127
Figure 83 : Résultats des essais d'écotoxicité sur l'ensemble des bioindicateurs testés 128
Figure 84. Image à la loupe binoculaire (×1.2) d'agrégats des mélanges M1 TA/DV et M2 TA/CO 132
Figure 85. Valeurs de MWD mesurées avec le test de réhumectation lente sur les agrégats de TA/CO et TA/DV en fonction du nombre de cycles d'humectation dessiccation appliqués. Comparaison avec des mélanges à humidité constante (H) durant les 56 jours (Rokia et al., 2014) 132
Figure 86. Forme et nature de la biomasse microbienne après 56 jours d'essai dans le compost de boues et les déchets verts (Image réalisée au MET par la société Microhumus, d'après Rokia, 2014) 133
Figure 87. Indexation des pics majeurs des diffractogrammes de rayon X sur poudre pour la terre acide et la brique et clichés en microscopie électronique à balayage (réalisation E. Joussein, Université Limoges, 2013) 133
Figure 88. Influence du facteur biologique sur le diamètre moyen (MWD) (mm) des agrégats du sol témoin (Témoin) et des mélanges TA/DV, TA/CO, BR/DV après les modalités de sol nu (SN), culture de raygrass (RG) et celle de colza (CZ) durant 55 jours 134
Figure 89. Influence des différentes modalités de culture sur le diamètre pondéré moyen des agrégats du sol témoin agricole (a), des mélanges TA/DV (b), TA/CO (c) et BR/DV (d), A et B désignant les différences significatives (p-value<0,05) 135
Figure 90. Essais de plantation sur les mélanges BR/CO, BA/DR/CO et TA/CO. 136
Figure 91. Dispositif expérimental de l'essai Soxhlet. 136
Figure 92. Résultats des extractions séquentielles pour le fer après réalisation des essais de vieillissement accélérés (témoin non vieilli, soxhlet, essai arrosé mais non planté, essai planté) 137
Figure 93 : Aspect des lysimètres pendant les premières étapes du démantèlement et préparation des échantillons (quartage + tamisage) 139

Figure 94 : Evolution du pH_{eau} au cours du temps (t_0 et t_{2ans}) et en fonction de la profondeur pour les modalités "square & parc" et "arbre de plantation "..... 140
Figure 95 : Evolution de la concentration en carbone organique au cours du temps (t_0 et t_{2ans}) et en fonction de la profondeur pour les modalités "square & parc" et "arbre de plantation " 141
Figure 96 : Evolution de la concentration en azote total au cours du temps (t_0 et t_{2ans}) et en fonction de la profondeur pour les modalités "square & parc" et "arbre de plantation " 142
Figure 97 : Evolution de la concentration en phosphore assimilable au cours du temps (t_0 et t_{2ans}) et en fonction de la profondeur pour les modalités "square & parc" et "arbre de plantation "..... 143
Figure 98 : Evolution de la concentration en calcaire total au cours du temps (t_0 et t_{2ans}) et en fonction de la profondeur pour les modalités "square & parc" et "arbre de plantation " 144
Figure 99 : Evolution de la masse volumique apparente au cours du temps (t_0 et t_{2ans}) et en fonction de la profondeur pour les modalités "square & parc" et "arbre de plantation " 145
Figure 100. Evolution du diamètre moyen pondéré (MWD) au cours du temps (t0 et t2ans) et en fonction de la profondeur pour les modalités "square & parc" et "arbre de plantation " 146
Figure 101. Résultats des extractions séquentielles pour le fer en fonction de la profondeur dans le lysimètre «SQUARE & PARC» 147
Figure 102. Evolution du diamètre moyen pondéré (MWD) au cours du temps (t12 et t2ans) et en fonction de la profondeur pour les modalités des mélanges terre-pierre..... 150
Figure 103. Evolution de la réserve utile des matériaux en 2014 et 2015. Les barres d'erreurs sont des erreurs standard (n=3)..... 151
Figure 104. Evolution de la macroporosité des matériaux en 2014 et 2015. Les barres d'erreurs sont des erreurs standard (n=3)..... 151
Figure 105 : Profil racinaire de la modalité « square & parc » 152
Figure 106 : Profil racinaire de la modalité « arbre de plantation »..... 153
Figure 107. Distribution de la biomasse racinaire (teneur volumique) des Acer platanoïdes dans le matériaux de croissance (à gauche) et dans les matériaux squelette (à droite) en fonction de la profondeur (lysimètres d'Angers) 154
Figure 108 : Courbes cumulées des précipitations, de l'évapotranspiration et du drainage exprimées en mm pour les deux modalités de sol construit 155
Figure 109 : Evolution du COD des percolats des deux modalités de sols construits..... 155
Figure 110 : Evolution des concentrations en ions majeurs en fonction du volume de percolats a) modalité « square et parc » et b) la modalité « arbre de plantation »..... 156
Figure 111 : Evolution des concentrations en éléments traces métalliques en fonction du volume de percolats pour la modalité « square et parc » 157
Figure 112 : Evolution des concentrations en éléments traces métalliques en fonction du volume de percolats pour la modalité « arbre de plantation » 158
Figure 113 : Ecotoxicité du mélange BR/CO sur les bioindicateurs terrestres 161
Figure 114 : Ecotoxicité du mélanges BE/DV/TA sur les bioindicateurs terrestres (partie A : les effets écotoxiques du BE n'ont pas été évalués sur les indicateurs terrestres)..... 162
Figure 115 : Effets du mélange BA/SP sur les bioindicateurs terrestres 162
Figure 116 : Phytotoxicité des mélanges frais et des échantillons des prélevés dans les deux lysimètres sur l'orge et le cresson.. 163
Figure 117 : Phytotoxicité des échantillons prélevés dans les deux lysimètres..... 163
Figure 118 : Représentation graphique des profondeurs de prélèvement (à gauche) et des résultats d'écotoxicité aquatique en fonction de la profondeur (à droite) pour le lysimètre L19 (square et parc) 164
Figure 119. (A) Biomasse aérienne totale des arbres se développant dans les matériaux squelette témoin, TA/BA/BS et TA/DB/DV en 2014 et 2015, (B) Ordre de ramification des arbres en fonction du matériau squelette en 2015 167
Figure 120 courbe de minéralisation du compost seul et des mélanges TA/CO, BR/CO et TA/DV durant 187 jours, exprimé en carbone minéralisé C-CO_2 par rapport au carbone organique total initial 168
Figure 121 régression linéaire de MWD= f(biomasse microbienne) pour chaque mélange TA/DV et TA/CO avec les données obtenues à l'issue de l'expérience d'alternance de cycles HD 169
Figure 122 Biomasse sèche aérienne mesurée pour le ray-grass et le colza 55 jours après semis. Les valeurs présentées avec la même lettre ne présentent pas de différence significative. Les barres d'erreurs sont des erreurs standard (n=3) 172
Figure 123 Teneurs en P mesurées dans la biomasse aérienne du ray-grass et du colza 55 jours après le semis. Les valeurs suivies par des lettres différentes pour un même traitement et entre les mixtures sont significativement différentes. Les barres d'erreurs sont des erreurs standard (n=3) 173
Figure 124 Analyse en composante principale des paramètres physique (MWD), chimiques (pH, P_{Olsen}, N_{tot}, C_{tot}) et biologique (biomasse sèche aérienne) mesurés après 55 jours pour les traitements sol nu (SN), ray-grass (RG) et colza (CZ) pour tous les mélanges et le témoin. 174
Figure 125 : Schéma synthétique des procédures de mise sur le marché des matières fertilisantes 179
Figure 126 : Modélisation et chronologie des coûts 183

Figure 127 : Structure des coûts (en €/tonne) de l'horizon croissance par filière et coût total (en €/tonne) des mélanges pour l'horizon croissance 187
Figure 128 : Structure des coûts (en €/tonne) de l'horizon squelette par filière et coût total (en €/tonne) des mélanges pour l'horizon squelette 188
Figure 129 : Les étapes et dynamiques d'analyse autour de l'acceptabilité sociale des matériaux et mélanges 201
Figure 130 : Perception et évaluation visuelle des matériaux sans noms associés 202
Figure 131 : Évaluation des matériaux à partir de leur nom uniquement (sans visuel associé) 203
Figure 132 : Taux de reconnaissance des matériaux 203
Figure 133 : Hiérarchisation des mélanges SITERRE 204
Figure 134 : Synthèse des différentes étapes d'analyse et note globale (de 0 à 3) 205
Figure 135 : Flux et traitement de données opérés par l'outil 225
Figure 136 : Exemple de résultats de l'outil pour un mélange 226

TABLEAUX

Tableau 1 : Indicateurs de fertilité physique et chimique sélectionnés pour le programme SITERRE. Les valeurs des indicateurs (0 à 3) ont été définies en termes de fertilité agronomique 4
Tableau 2 : Liste des 13 matériaux minéraux-inertes et des 14 matériaux organiques donnant lieu à fiche bibliographique détaillée 8
Tableau 3 : Liste des 11 matériaux modèles, minérales-inertes et organiques, ... 11
Tableau 4 : Récapitulatif des traitements appliqués en vue de préparer une fraction <4 mm 17
Tableau 5 : Bilan de la séparation densimétrique 17
Tableau 6 : Matrices principales des échantillons considérées pour analyses chimiques 21
Tableau 7 : Prétraitements appliqués sur les matériaux pour le test de lixiviation 23
Tableau 8 : Liste des essais d'innocuité menés selon les matériaux et préparation du matériau 25
Tableau 9 : Indice de résistance au gel/dégel suivant la norme EN1367-1 28
Tableau 10 : Résultats des essais mécaniques 29
Tableau 11 : Distribution granulométrique des échantillons analysés (% sec) 31
Tableau 12 : Eléments majeurs (mg/kg) et matières volatiles à 450°C (%). Résultats pour la fraction inférieure à 2 mm 32
Tableau 13 : Eléments majeurs (mg/kg) et matières volatiles à 450°C (%). Résultats pour la fraction inférieure à 4 mm 32
Tableau 14 : Eléments traces (mg/kg). Résultats des analyses de la fraction inférieure à 2 mm 34
Tableau 15 : Eléments traces (mg/kg). Résultats des analyses de la fraction inférieure à 4 mm 34
Tableau 16 : Valeurs de référence pour les sols et les boues 34
Tableau 17 : Résultats des analyses de PCB (mg/kg) 36
Tableau 18 : Résultats des analyses de HAP (mg/kg) 37
Tableau 19 : Phases minérales identifiées par DRX (hors argiles) 39
Tableau 20 : Phases argileuses identifiées par DRX et valeurs au bleu de méthylène 40
Tableau 21 : Valeurs de bleu de référence et type de « sol » associé (SETRA, 1992) 40
Tableau 22 : Capacité de neutralisation acide et basique des matériaux. 41
Tableau 23 : Couleur des matériaux, d'après le code Munsell® 42
Tableau 24 : Densités apparentes et densités réelles des matériaux étudiés 50
Tableau 25 : Humidités caractéristiques et calcul de la réserve en eau utile des matériaux étudiés 50
Tableau 26 : Conductivités hydrauliques à saturation (Ks) 51
Tableau 27 : Répartition granulométrique des matériaux après destruction des matières organiques et sans décarbonatation tamisés à 2 mm 52
Tableau 28 : Fractions organiques et minérales des matériaux étudiés 54
Tableau 29 : Concentrations en Si Al Fe extractibles dans les matériaux étudiés et gammes usuelles dans les sols naturels (Jeanroy, 1983) 55
Tableau 30 : Valeurs de pH, concentrations en calcaire total, calcaire actif, carbone total et carbone organique 55
Tableau 31 : Concentration en azote total, phosphore disponible et capacité d'échange cationique 56
Tableau 32 : Synthèse des résultats du test de lixiviation 61
Tableau 33 : Valeurs des NOEC et EC50 des lixiviats des matériaux étudiés (NT : non toxique) 65
Tableau 34 : Résultats d'analyses agents pathogènes pour 5 matériaux individuels 67
Tableau 35 : Mélanges testés pour chaque type de déchet 69
Tableau 36 : Caractéristiques agronomiques des matériaux organiques 70
Tableau 37 : Coefficients utilisés pour la modélisation de la masse volumique apparent (MVA) des mélanges, pour chaque matériau CO, BE, BS, DV, SP, DR, TA, TB, DB, BR et BA 77
Tableau 38 : Mélanges modèles retenus pour la suite du projet 80
Tableau 39 : Résultats des essais mécaniques 85
Tableau 40 : Indices d'évaluation des proriétés physiques et mécaniques des matériaux 87
Tableau 41 : Evaluation des mélanges testés 88
Tableau 42 : Eléments majeurs (mg/kg) et matières volatiles à 450°C (% masse). Résultats pour la fraction inférieure à 2 mm 91
Tableau 43 : Eléments traces (mg/kg). Résultats des analyses de la fraction inférieure à 2 mm 92
Tableau 44 : Synthèse des résultats du test de lixiviation 93
Tableau 45 : Synthèse des résultats du test de lixiviation (éléments traces) 94
Tableau 46 : Déchets et références 94
Tableau 47 : Composition des sols artificiels soumis à la percolation 95
Tableau 48 : Classement des mélanges selon leur capacité polluante par élément métallique toxique (mg/kg MS) 98
Tableau 49 : Classement des mélanges selon leur caractéristique pédologique (mg/kg MS) 99
Tableau 50 : Composition des mélanges utilisés pour les essais de simulation 100
Tableau 51 : Classement des combinaisons de mélanges selon leur capacité polluante 101
Tableau 52 : Classement des combinaisons de mélanges selon leur caractéristique pédologique 102

Tableau 53 : Résultats des calculs géochimiques concernant la balance ionique et électrique 103
Tableau 54 : Granulométrie avec et sans décarbonatation des mélanges sélectionnés 112
Tableau 55 : Propriétés chimiques des mélanges sélectionnés (1/2) 112
Tableau 56 : Propriétés chimiques des mélanges sélectionnés (2/2) 113
Tableau 57 : pH et conductivité des mélanges 117
Tableau 58 : Composition des 6 mélanges testés (en % massique ou volumique, humide) 128
Tableau 59 : Teneurs en éléments métalliques dans les mélanges (fraction inférieure à 2 mm), et comparaison avec les PNEC (predictive no effect concentration, ou concentration prédictive sans effet) .. 129
Tableau 60 : Résultats des analyses en agents pathogènes des mélanges 130
Tableau 61. Synthèse des résultats de caractérisation par Mössbauer du statut du fer 138
Tableau 62. Composition du matériau de croissance et des matériaux squelette. 139
Tableau 63. Résultats de caractérisation par Mössbauer du statut du fer dans le lysimètre L19 et comparaison avec le témoin à t_0 147
Tableau 64. Caractéristiques chimiques des matériaux, un an (2014) et deux ans (2015) après la plantation d'arbres, et mise en évidence des excès et carences en éléments pour la croissance végétale. Les chiffres entre parenthèses sont les erreurs standard (n=3) 149
Tableau 65. Evolution du stock calculé et flux mesurés en éléments majeurs pour la modalité "square & parc" 159
Tableau 66. Evolution du stock calculé et flux mesurés en éléments en traces pour la modalité "square & parc" 159
Tableau 67. Comparaison de la qualité des eaux de drainage avec les valeurs seuils réglementaires 160
Tableau 68 Classe de stabilité, battance et érosion en fonction de valeurs du diamètre moyen pondéral après désagrégation MWD) d'après Le Bissonnais et Le Souder (1995) 166
Tableau 69. Evolution du stock en carbone organique calculé et flux mesurés en éléments majeurs pour la modalité "square & parc" 167
Tableau 70 : biomasse microbienne et carbone microbien (C_{mic}) comparé au carbone total (C_{tot}) 169
Tableau 71 Propriétés physiques et chimiques des 4 déchets sélectionnés, du sol témoin et des 4 mélanges de déchets 172
Tableau 72 Rapport entre le P assimilable et le P total et rapport entre le P accumulé dans les parties aériennes et le P total initial contenu dans chaque mélange. 173
Tableau 73 Correlation coefficients (r) between physical parameter (MWD), chemical parameters (pH, P_{Olsen}, N_{tot}, C_{tot}) and biological parameters (dry aerial biomass) of the principal component analysis. Values in bold are significant correlations at the 0.05 probability level. 174
Tableau 74 : Evaluation semi-quantitative des services écosystémiques rendus par les sols construits, en comparaison des pratiques habituelles 177
Tableau 75 : Teneurs maximales en ETM 180
Tableau 76 : Détail des proportions de mélanges retenus pour les estimations 186
Tableau 77 : Résultats des estimations des coûts (en €/tonne) pour l'horizon croissance 187
Tableau 78 : Résultats des estimations des coûts (en €/tonne) pour l'horizon squelette 188
Tableau 79 : Principales caractéristiques des bases de données relatives aux teneurs en éléments traces métalliques dans les sols 207
Tableau 80 : Choix des Valeurs Toxicologiques de Références 209
Tableau 81 : Choix des paramètres d'exposition 210
Tableau 82 : Concentrations en polluants dans les matériaux d'apport 211
Tableau 83 : Scénario square - Promeneurs adultes - Choix des paramètres d'exposition et valeurs limites calculées dans les sols pour les effets à seuils et les effets sans seuils 213
Tableau 84 : Scénario square – Promeneurs enfants - Choix des paramètres d'exposition et valeurs limites calculées dans les sols pour les effets à seuils et les effets sans seuils 213
Tableau 85 : Scénario square – Chargé d'entretien - Choix des paramètres d'exposition et valeurs limites calculées dans les sols pour les effets à seuils et les effets sans seuils 214
Tableau 86 : Scénario square – Promeneurs adultes – Calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 214
Tableau 87 : Scénario square – Promeneurs enfants - Chargé d'entretien – Calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 215
Tableau 88 : Scénario square – Chargé d'entretien – Calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 215
Tableau 89 : Scénario square – Promeneurs adultes – Résumé des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 216
Tableau 90 : Scénario square – Promeneurs enfants – Résumé des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 216
Tableau 91 : Scénario square –- Chargé d'entretien – Résumé des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 217

Tableau 92 : Scénario square –- Promeneurs adultes – Résumé des concentrations dépassant les valeurs limites suite aux calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 217
Tableau 93 : Scénario square –- Promeneurs enfants – Résumé des concentrations dépassant les valeurs limites suite aux calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 218
Tableau 94 : Scénario square –- Chargé d'entretien – Résumé des concentrations dépassant les valeurs limites suite aux calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 218
Tableau 95 : Scénario alignement - Promeneurs adultes - Choix des paramètres d'exposition et valeurs limites calculées dans les sols pour les effets à seuils et les effets sans seuils 219
Tableau 96 : Scénario alignement – Promeneurs enfants - Choix des paramètres d'exposition et valeurs limites calculées dans les sols pour les effets à seuils et les effets sans seuils 219
Tableau 97 : Scénario alignement – Chargé d'entretien - Choix des paramètres d'exposition et valeurs limites calculées dans les sols pour les effets à seuils et les effets sans seuils 220
Tableau 98 : Scénario alignement – Promeneurs adultes – Calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 220
Tableau 99 : Scénario alignement – Promeneurs enfants - Chargé d'entretien – Calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 221
Tableau 100 : Scénario alignement – Chargé d'entretien – Calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 221
Tableau 101 : Scénario alignement – Promeneurs adultes – Résumé des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 222
Tableau 102 : Scénario alignement – Promeneurs enfants – Résumé des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 222
Tableau 103 : Scénario alignement –- Chargé d'entretien – Résumé des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 223
Tableau 104 : Scénario alignement –- Promeneurs adultes – Résumé des concentrations dépassant les valeurs limites suite aux calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 223
Tableau 105 : Scénario alignement –- Promeneurs enfants – Résumé des concentrations dépassant les valeurs limites suite aux calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 224
Tableau 106 : Scénario alignement –- Chargé d'entretien – Résumé des concentrations dépassant les valeurs limites suite aux calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges 224

I. Présentation du programme SITERRE

Cette première partie présente (i) le contexte, objectifs et le besoin de recherche exprimé par les professionnels des espaces verts à l'origine de la genèse du programme SITERRE, et (ii) le contenu et la structure par tâches du travail entrepris.

I.1. Contexte et objectifs du projet

Les professionnels des espaces verts utilisent actuellement de la terre végétale issue du décapage de surfaces agricoles (territoires gagnés par l'urbanisation), ainsi que des granulats de carrière pour constituer les mélanges terreux de plantations d'arbres d'alignements et d'aménagements paysagers.
L'usage de ces matériaux pose des problèmes à trois niveaux : (i) matériaux non renouvelables ; (ii) distances de plus en plus grandes pour assurer l'approvisionnement (coûts économiques et environnementaux croissants) ; (iii) les ressources disponibles annuellement devraient se raréfier à l'avenir compte tenu des politiques d'urbanisme actuelles orientées vers la limitation de l'étalement urbain.
Partant de cette recherche d'alternatives à ces matériaux, le projet SITERRE développe une démarche de génie pédologique pour construire des sols possédant les fonctions de fertilité agronomique et de portance recherchées.
L'objectif de ce projet est de mettre au point un ou des procédé(s) innovant(s) de construction de sols en substitution de la terre végétale, en remplaçant pour partie, si ce n'est intégralement, les sols naturels habituellement utilisés.

I.2. Contenu et structuration du projet

Le projet est structuré en 5 tâches dont le déroulement et l'enchaînement sont majoritairement chronologiques : séquentiels pour les tâches 1, 2 et 3 ; parallèle pour la tâche 4, en partie, et tâche 5 (cf. planning dans le paragraphe suivant).

- Tâche 1 : Typologie des matériaux utilisables (TYPO)
Il s'agit de recenser et décrire les sources de matériaux qui peuvent rentrer dans la construction de sols.

- Tâche 2 : Caractérisation des matériaux (CaractMAT)
Cette tâche est consacrée à la caractérisation individuelle d'une sélection limitée de matériaux, (initialement 10 puis finalement porté à 11 matériaux) jugés les plus pertinents en terme d'usage parmi tous les matériaux identifiés dans la Tâche 1. Cette caractérisation porte sur les propriétés agronomiques, mécaniques, de contamination éventuelle de l'environnement et d'écotoxicité.

- Tâche 3 : Formulation et propriétés des matériaux en mélange (ForMEL)
Le développement est identique à la tâche précédente (CaractMAT) à la différence près que les caractérisations portent désormais sur des mélanges de matériaux. En préalable, les modalités de mélange et de formulation sont définies à partir des résultats de caractérisation des matériaux individuels, et des propriétés attendues selon des typologies d'aménagements paysagers pré établies.

- Tâche 4 : Evolution des Technosols (EvolSOL)
Cette tâche est consacrée à l'étude de l'évolution des mélanges de matériaux vers des sols construits. Ce volet cristallise les attentes scientifiques les plus importantes de par les phénomènes pédogénétiques susceptibles d'être mis en évidence et caractérisés (évolution physique et chimique des sols construits). La compréhension du fonctionnement de ces sols construits se basera fortement sur les caractérisations individuelles de matériaux et des mélanges.

- Tâche 5 : Vers l'élaboration de la filière par une approche et méthode multicritères (Elab).
Il s'agit d'évaluer, au-delà des travaux en conditions contrôlées, l'opérationnalité du ou des procédés. Les entreprises directement impliquées dans la valorisation et l'exploitation du procédé orienteront les modalités de transfert technologique des résultats vers les professionnels. Les aspects techniques, économiques, environnementaux, sanitaires, réglementaires et sociétaux seront particulièrement pris en compte de manière à vérifier la conformité d'exploitation du procédé et d'identifier les verrous et leviers d'actions possibles.

II. Liste et typologie des matériaux potentiels, et choix des matériaux modèles du programme (=Tâche 1)

II.1. Une conception et construction de sol guidée par l'usage

La construction de sol suit un certain nombre de fondements. Pour atteindre un niveau de fonctionnalité optimal, il est nécessaire de construire des sols constitués d'horizons distincts, de manière analogue à la plupart des sols naturels. Ces couches doivent présenter des propriétés qui leur permettent de remplir un ensemble de fonctions définies, par exemple : réserve en eau, imperméabilisation, source de nutriments et de matières organiques. L'usage attendu pour le sol construit (par exemple : intégration paysagère, production de biomasse, confinement, phytoremédiation) peut s'exprimer en termes de niveau de fonctionnalités à atteindre.

II.1.a. Définition des paramètres de fonctionnalités des sols construits

A partir de la classification des espaces verts définie par l'Association des Ingénieurs Territoriaux de France, il a été possible de définir cinq usages-modèles principaux de sols en ville. Ces usages modèles ont été retenus pour leur représentativité dans l'espace urbain, leur pertinence par rapport aux objectifs de recherche de matériaux de substitution et leurs différences sur la base des critères évalués (entretien, propriétés, sensibilité vis-à-vis du public, etc.).
Pour chacun des cinq usages modèles, les exigences du type de sol peuvent été décrites au regard des principales grandes fonctions du sol :

- fonction de support (portance, besoin en sol) ;
- fonction d'alimentation en eau (drainage, végétation) ;
- fonction de filtre et d'échange (risque sanitaire).

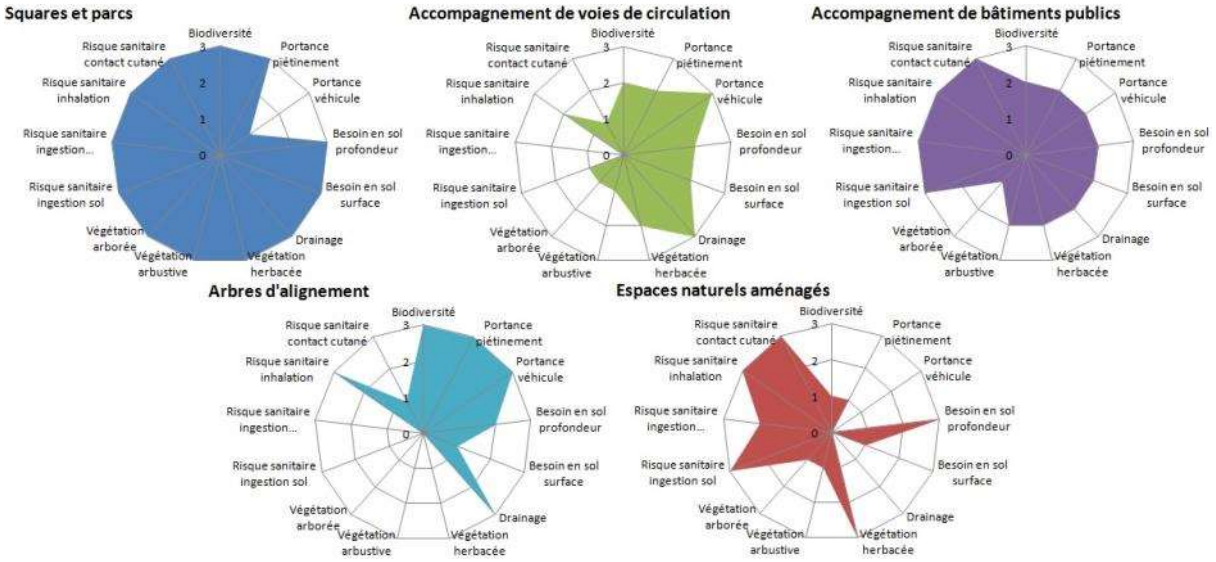


Figure 1 : Profils fonctionnels des cinq usages modèles de sols en ville définis pour assurer les fonctions de support, d'alimentation en eau et de filtre et échange

Dans ces graphiques (Figure 1), une note de zéro signifie que le besoin pour une typologie donnée est faible. Une note de trois signifie au contraire que le besoin est important.
Ces profils fonctionnels montrent la nécessité de définir des profils de sol adaptés pour répondre aux contraintes et aux exigences.

II.1.b. Définition d'un profil de sol en fonction de l'usage

Pour chaque usage de végétalisation attendu, il convient de définir les "profils de sols idéaux" en précisant le nombre d'horizons, leur dimension et position, leur caractéristique (croissance, squelette et/ou technique).
Il s'agit notamment de construire des horizons de sols favorisant le développement racinaire (horizon de croissance), ainsi que des horizons favorisant la portance du sol et garantissant l'écoulement de l'eau libre (horizon technique/squelette).
Pour l'usage "square et parc urbain", la structure du sol peut se décliner en deux horizons distincts (Figure 2) : un horizon de croissance correspondant à la couche de surface et un horizon technique correspondant à la couche de profondeur.

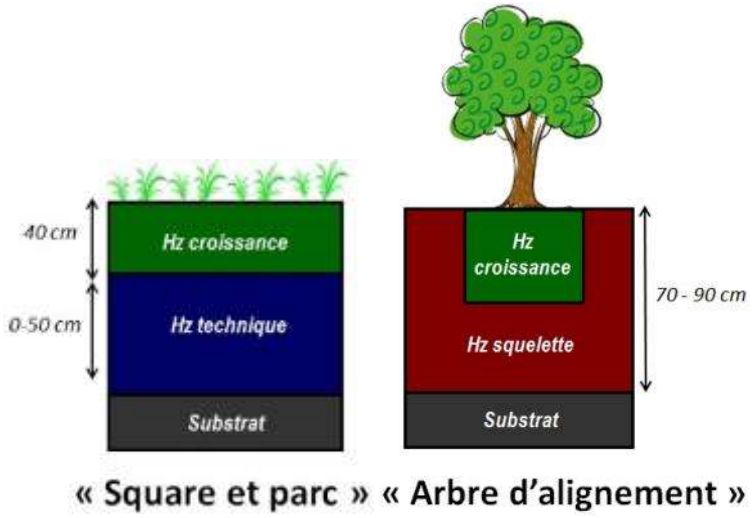


Figure 2 : Profils de sol des usages "Square et parc urbain" et "Arbre d'alignement"

Pour l'usage "Arbre d'alignement", la structure du sol comprend également deux horizons distincts mais organisés différemment (Figure 2) : un horizon de croissance qui correspond ici à la motte qui entoure les racines de l'arbre; et, un horizon squelette, correspondant à un mélange terre-pierres (avec matériaux de substitution), représentant le volume majeur de la fosse de plantation.

II.1.c. Définition des propriétés idéales de chaque horizon

Les propriétés agronomiques attendues pour chacun des horizons des profils de sol doivent être quantifiées sur quelques indicateurs de qualité des sols définis. En combinant les interprétations des analyses agronomiques classiques et les recommandations sur la qualité des sols, le programme SITERRE a sélectionné les indicateurs physiques et chimiques les plus pertinents pour répondre aux objectifs de sol support du développement végétal (Tableau 1). Les propriétés idéales définies pour chaque horizon servent ainsi d'objectifs de fertilité à atteindre pour l'usage de végétalisation attendu.

Tableau 1 : Indicateurs de fertilité physique et chimique sélectionnés pour le programme SITERRE. Les valeurs des indicateurs (0 à 3) ont été définies en termes de fertilité agronomique

Paramètre		Unité	Note	Gamme de valeurs	Interprétation
Fertilité chimique	M.O.	g.kg-1	0	< 10	très faible
			1	10 à 40	faible
			2	> 100	élevé
			3	40 à 100	optimal
	Ntotal	g.kg-1	0	< 2	très faible
			1	2 à 10	faible
			2	> 20	élevé
			3	10 à 20	optimal
	C/N	-	0	< 6 ou > 15	défavorable
			1	6 à 8 ou 12 à 15	peu favorable
			2	10 à 12	assez élevé
			3	8 à 10	optimal
	P Olsen	g.kg-1	0	< 0,04	faible
			1	0,04 à 0,08	modéré
			2	0,08 à 0,12	élevé
			3	> 0,12	très élevé
	CEC	méq.100g-1	0	< 12	faible
			1	12 à 25	modéré
			2	25 à 40	élevé
			3	> 40	très élevé
	CaCO3	g.kg-1	0	> 500	défavorable
			1	250 à 500	à risque
			2	10 ou 50 à 250	peu favorable
			3	10 à 50	optimal
	pH	-	0	< 5,5 ou > 8,5	défavorable
			1	5,5 à 6,5	à risque
			2	7,5 à 8,5	peu favorable
			3	6,5 à 7,5	optimal
Fertilité physique	Réserve utile	mm.cm-1	0	< 0,5	très faible
			1	0,5 à 1	faible
			2	1 à 1,5	élevé
			3	> 1,5	optimal
	Densité apparente	g.cm-1	0	> 1,7	très faible
			1	1,5 à 1,7	faible
			2	1,2 à 1,5	élevé
			3	< 1,2	optimal
	Macroporosité	m3.m-3	0	< 0,05	très faible
			1	0,05 à 0,1	faible
			2	0,1 à 0,2	élevé
			3	> 0,2	optimal

II.2. Les matériaux de substitution potentiels

Un point important dans l'identification de matériaux potentiels pour la construction de sols est de n'écarter aucune option. Comment ne pas passer à côté d'une ressource potentielle dans la diversité existante ?
C'est possible, en réalisant une sélection à partir du Catalogue Européen des Déchets, le référentiel officiel européen des déchets, ou des matières premières secondaires selon comment on souhaite l'entendre. Il s'agit de la démarche mise en œuvre au cours du programme de recherche SITERRE pour un recensement à caractère générique sur le plan national français. Cette démarche peut être réutilisée pour individualiser toute démarche régionale ou à vocation encore plus locale.
La méthodologie de sélection est présentée ci-après en développant la sélection opérée au cours du programme SITERRE pour identifier à l'échelle nationale les matériaux présentant le plus de potentiel d'étude et d'utilisation en construction de sols.

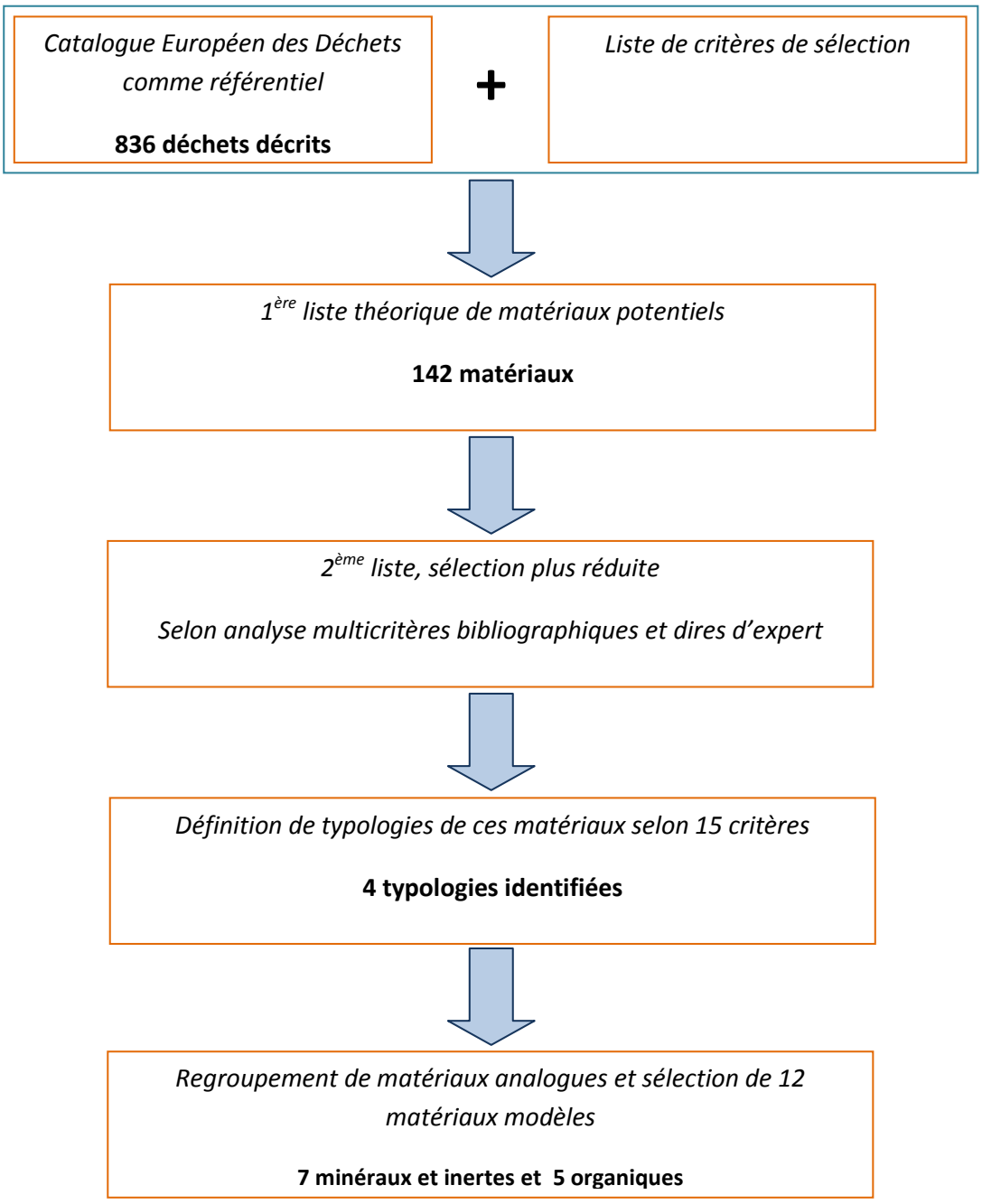


Figure 3 : Processus de sélection matériaux potentiels - exemple de la démarche nationale menée dans le programme SITERRE

Le Catalogue Européen des Déchets comme référentiel de travail

Le Catalogue Européen des Déchets est une nomenclature intégrant tous les déchets existants (par définition tout matériau délaissé pour un quelconque usage). Il a été publié en annexe de la décision de la Commission européenne n° 94/3/CEE du 20 décembre 1993. Chaque déchet possède un code à 6 chiffres, dont les deux premiers sont ceux de la catégorie d'origine et les deux suivants sont ceux de son regroupement intermédiaire. Une étoile à la fin du code précise son éventuel caractère dangereux.

> Exemple : le code 17 03 01* correspond à des «mélanges bitumineux contenant du goudron»
> Il appartient à la catégorie 17 « Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés) »; puis à la rubrique 03 « Mélanges bitumineux, goudron et produits goudronnés », et enfin à la classe de déchet 01 de cette rubrique « Mélanges bitumineux contenant du goudron ». L'astérisque * indique qu'il est désigné comme dangereux.

Cette nomenclature est révisée régulièrement. Elle est presque exhaustive puisque même un déchet « orphelin » peut être répertorié, en le classant selon sa catégorie, sa rubrique, terminé du code 99 pour « déchet non spécifié ailleurs ».
Il recense aujourd'hui 836 déchets.

II.2.a. Grille de critères en vue de la sélection des matériaux

Le principe à retenir est d'opérer une sélection à partir du Catalogue Européen des Déchets sans qu'aucun *a priori* ou pré-requis n'intervienne. Il s'agit dans un premier temps d'une sélection par élimination, à partir de critères rédhibitoires d'utilisation d'un matériau en construction de sols, et basé sur la dénomination du matériau. Ainsi le bénéfice du doute est attribué à un matériau quand il n'est pas possible d'évaluer son potentiel d'usage à la seule lecture de son intitulé. En cas de doute, un matériau est donc retenu pour étude plus approfondie à l'aide de la bibliographie, ou bien directement à l'aide d'une analyse précise si cela est souhaité dès ce stade.

Une première base de sélection par critères d'élimination

Les **17 critères** d'élimination suivants ont été définis comme rédhibitoires pour tout potentiel d'usage en construction de sols. Ils tiennent pour l'essentiel du bon sens commun, et reposent sur leur dangerosité, leur potentiel d'impact environnemental ou sanitaire évident, l'évaluation de la forme de la matière ou de son état incompatible avec la formulation et la réalisation d'un mélange de matériaux, l'évaluation quantitative d'un gisement jugé très faible à anecdotique :

- déchets déclarés officiellement dangereux (14 classes, et codés avec *) ;
- déchets codés « 99 » (= déchets inexistants ou orphelins non spécifiés ailleurs) ;
- déchets médicaux (infectieux, pharmaceutiques, coupants) ;
- piles et accumulateurs, mêmes broyés (métaux, sels métalliques solubles, graphite) ;
- présence de métaux (par exemple : déchets de l'industrie photographique, déchets d'équipement électriques et électroniques, catalyseurs, peintures, etc.) ;
- présence de résidus de l'activité de la tannerie (fort risque de présence de chrome par exemple) ;
- matériaux concentrant les polluants (filtres par exemple) ;
- présence d'encres ; présence de détergents ;
- matériaux issus des fumées d'épuration ;
- présence d'amiante ;
- déchets mélangés, et dénominations trop vastes, signes d'une composition hétérogène et variable ;
- eaux de systèmes de refroidissement (présence systématique d'anti-oxydants et de biocides) ;
- liquides, boues très liquides et gaz (les boues, pâtes et solides sont conservés) ;
- graisses, cires, colles, silicones (difficiles à fragmenter et mélanger, inutiles et même asphyxiants dans une formulation) ;
- encombrants ;
- matériaux dont le gisement est de toute évidence très anecdotique.

Par croisement du Catalogue Européen des Déchets et de la liste de critères d'élimination, une première liste de matériaux potentiellement utilisables est obtenue. Elle est théorique et ne garantit pas une utilisation possible. Elle constitue cependant un excellent premier jalon de travail. Pour tous travaux futurs, elle représente la base de prospection possible de matériaux, sans qu'aucun pré-requis ou a priori n'ait été appliqué.

Cette liste représente **142 matériaux potentiels** dont **102 sont minéraux, plastiques ou inertes**, et **40 sont organiques**. Ces deux listes sont présentées en Annexe 1 et Annexe 2.

Une deuxième sélection à partir de la bibliographie et dire d'experts

Compte-tenu du nombre important de matériaux obtenus à l'issue de la première liste de matériaux, une liste plus réduite de 27 matériaux est obtenue sur « dire d'experts ». Ce dire d'experts a consisté à :

- rechercher des informations et dégager une description succincte du matériau ;
- distinguer les matériaux organiques et les matériaux minéraux-inertes ;
- attribuer une note pour hiérarchiser les matériaux entre eux sur la base des critères suivants :
    - le gisement, sur son importance et sa présence nationale ou plus localisée sur le territoire (note de 0 pour « très peu » à 4 pour « important ») ;
    - propriétés du matériau (note 0 pour « mauvais » ou 1 pour « bon » par critère) :
        - nature à caractère toxique, pathogène ou écotoxicologique ;
        - fertilité chimique ; fertilité physique ;
        - portance (pour matériaux minéraux uniquement) ;
        - potentiel améliorant (impact sur la formulation) ;
        - aspect, critères organoleptiques (odeur, couleur, etc.).

Les matériaux sont classés par ordre décroissant selon la note finale. Les **27 matériaux** sélectionnés (Tableau 2) sont représentés par **13 matériaux minéraux ou inertes**, et **14 matériaux organiques**.

Un état de l'art bibliographique a été réalisé pour chacun de 27 matériaux, à partir des informations disponibles, et malheureusement parfois lacunaires sur les champs d'informations recherchés. Ces 27 fiches individuelles sont consultables en Annexe 3.

Tableau 2 : Liste des 13 matériaux minéraux-inertes et des 14 matériaux organiques donnant lieu à fiche bibliographique détaillée

Code déchet	Intitulé / Description
Matériaux minéraux et inertes	
10.12.08	déchets de produits en céramique, briques, carrelage et matériaux de construction (après cuisson)
10.13.01	déchets de préparation avant cuisson
10.13.04	déchets de calcination et d'hydratation de la chaux
16.01.03	pneus hors d'usage
17.01.01	béton
17.01.02	briques
17.01.03	tuiles et céramiques
17.01.07	mélanges de béton, briques, tuiles et céramiques autres que ceux visés à la rubrique 17.01.06
17.05.04	terres et cailloux autres que ceux visés à la rubrique 17.05.03
17.05.06	boues de dragage autres que celles visées à la rubrique 17.05.05
17.05.08	ballast de voie autre que celui visé à la rubrique 17.05.07
17.08.02	matériaux de construction à base de gypse autres que ceux visés à la rubrique 17.08.01
19.12.09	minéraux (par exemple : sable, cailloux)
Matériaux organiques	
02.01.07	déchets provenant de la sylviculture
02.01.03	déchets de tissus végétaux
02.05.02	boues provenant du traitement in situ des effluents
02.06.01	matières impropres à la consommation ou à la transformation
03.01.05	sciure de bois, copeaux, chutes, bois, panneaux de particules et placages autres que ceux visés à la rubrique 03.01.04
03.03.05	boues de désencrage provenant du recyclage du papier
03.03.11	boues provenant du traitement in situ des effluents autres que celles visées à la rubrique 03.03.10
17.02.01	bois
19.05.03	compost déclassé
19.08.05	boues provenant du traitement des eaux usées urbaines
19.08.12	boues provenant du traitement biologique des eaux usées industrielles autres que celles visées à la rubrique 19.08.11
02.02.01	boues provenant du lavage et du nettoyage
20.03.03	déchets de nettoyage des rues
20.03.06	déchets provenant du nettoyage des égouts

Il est fondamental de rappeler ici que cette sélection ne constitue pas la seule base de matériaux utilisables en construction de sols. Cette liste est à vocation générique et démonstrative sur le plan national. Localement, d'autres matériaux peuvent présenter une opportunité d'usage.

Les typologies de matériaux

Sur la base des données bibliographiques disponibles, il est ensuite possible de proposer des regroupements et de distinguer des typologies sur les matériaux.

Une analyse statistique n'a pas été possible du fait du manque de données quantitatives. Une approche qualitative a été réalisée à partir d'une comparaison graphique (données représentées sous forme de radar) d'un nombre réduit de 15 critères :

- Physique/mécanique
  - Portance
  - Densité apparente
  - Perméabilité à l'eau
  - StructureGranulométrie
- Agronomie/chimie
  - pH eau
  - Capacité d'échange cationique (CEC)
  - Carbone (C) organique
  - Azote (N) total
  - Phosphore (P) assimilable
  - Carbonate (CacO3) total
- Salinité/toxicité
  - Conductivité
  - pH sur éluat
  - Disponibilité des polluants
  - Concentration totale en polluants

De ce travail ressort quatre groupes de matériaux (exemples illustrés ci-après, détail en Annexe 4) :

- Le 1er groupe comprend les déchets de briques, de tuiles et céramiques, déchets de terre cuite, béton concassé, ballasts. Leurs principales caractéristiques sont (i) une granulométrie grossière (> 2 mm), (ii) une bonne à très bonne portance, un pH à tendance basique (>7,5).
- Le 2ème groupe comprend les déchets issus de la fabrication de la chaux/plâtre/ciment (avant cuisson ; de calcination et d'hydratation de la chaux), les terres excavées, les matériaux issus du dessablage de boues de stations d'épurations, les déchets issus du nettoyage des rues et du nettoyage des égouts, les boues de traitement des effluents, les mélanges de déchets du bâtiment. Leurs principales caractéristiques sont (i) une granulométrie sableuse à grossière, (ii) une pollution possible ou fréquente, un pH sur éluat à tendance basique (>7,5).
- Le 3ème groupe comprend les déchets de sylviculture, les déchets municipaux de jardins, les déchets de tissus végétaux, les déchets de boulangeries, les boues provenant du traitement in situ des effluents d'industrie laitière. Leurs principales caractéristiques sont (i) une teneur en carbone organique de 35 à 65%, en azote total de 1,5 à 3%, une CEC de 50 cmols/kg pour certains.
- Le 4ème groupe comprend les boues de dragage, les composts déclassés, les boues provenant des boues résiduaires urbaines, les boues de désencrage provenant du recyclage du papier, les boues provenant du traitement biologique des eaux usées industrielles, les déchets de gypse. Leurs principales caractéristiques sont (i) un phosphore assimilable élevé (> 0,12 mg/kg), une CEC variable, un pouvoir structurant possible, un risque possible de présence de polluants.

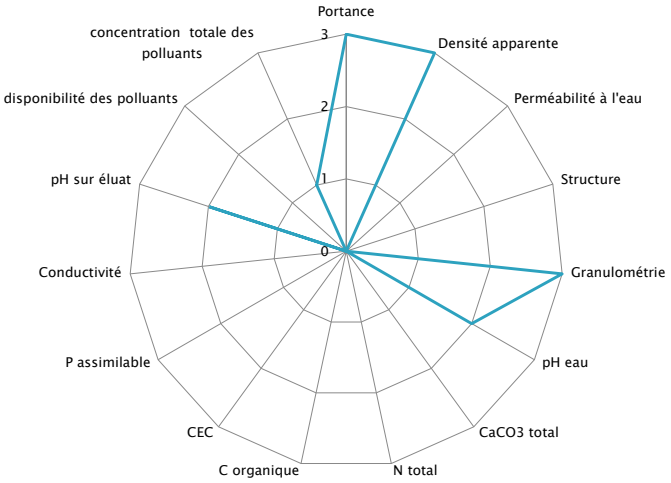


Figure 4 : Exemple de matériau du 1er groupe : briques, tuiles et céramiques

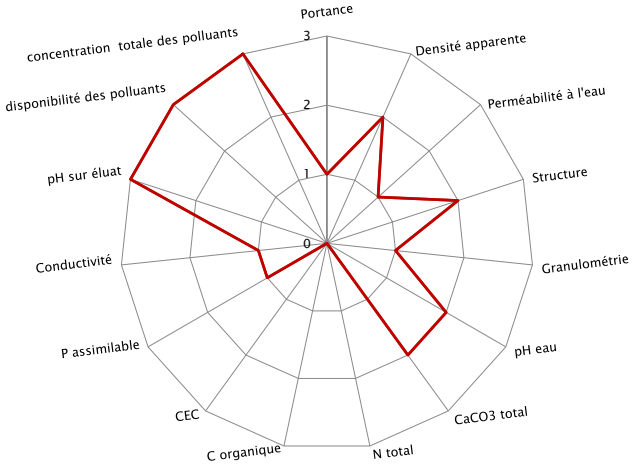


Figure 5 : Exemple de matériau du 2ème groupe : terres d'excavation

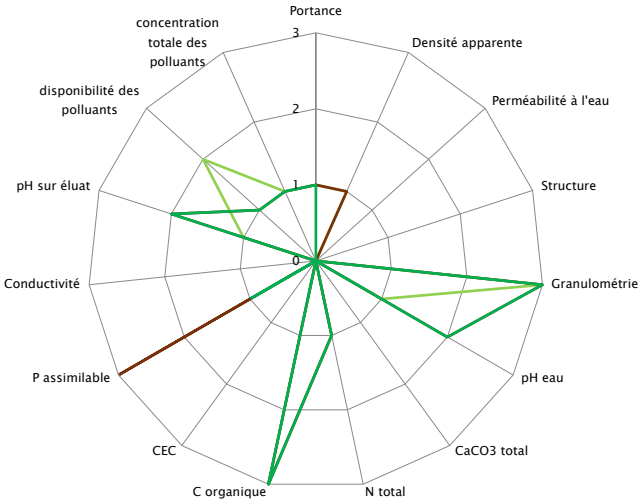


Figure 6 : Exemple de matériau du 3ème groupe : déchets de sylviculture, jardins municipaux, tissus végétaux

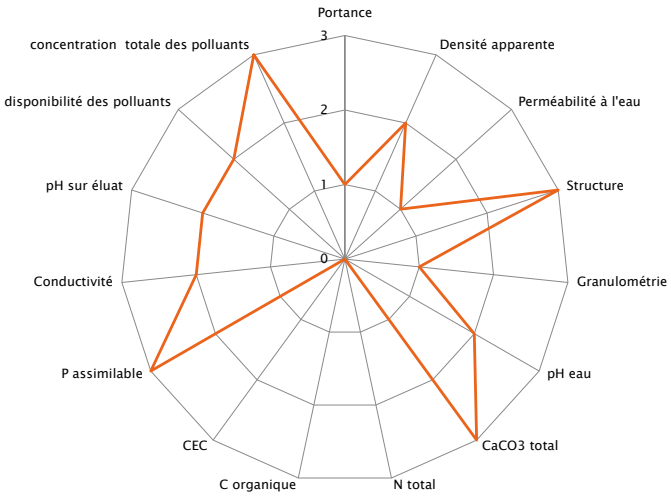


Figure 7 : Exemple de matériau du 4ème groupe : boues de dragage

II.2.b. Les matériaux de substitution présentant le plus de potentiel sur le plan national

Il ne ressort de ces résultats, ni de données rédhibitoires qui élimineraient un matériau, ni de mise en exergue particulière de qualité d'un matériau, en vue d'une utilisation en construction de sol. Ce travail met par contre en évidence des matériaux de caractéristiques proches. Par regroupement, on aboutit à un nombre réduit de matériaux à potentiel d'utilisation générique sur le plan national pour la construction de sols.
Voici la liste de ces 11 matériaux de substitution, qui ont servi de matériaux modèles pour le programme SITERRE.

Tableau 3 : Liste des 11 matériaux modèles, minérales-inertes et organiques, sélectionnés dans le programme SITERRE

Matériaux minéraux et inertes
Ecarts de fabrication de briques
Béton concassé
Ballasts usagés de chemins de fer
Déchets de déconstruction de bâtiments en mélange
Terres de déblais excavées non contaminées acides
Terres de déblais excavées non contaminées alcalines
Matériaux organiques ou organo-minéraux
Déchets verts broyés
Déchets de balayage de rues
Boues papetières
Boues de stations d'épuration
Compost de déchets verts et boues de STEP

Matériaux minéraux et inertes


Ballasts


Déchets de fabrication des briques


Béton de démolition


2 Terres excavées (pH acide et basique)


Déchets de déconstruction bâtiment en mélange

Matériaux organiques ou organo-minéraux


Déchets verts


Déchets provenant du nettoyage des rues


Sous-produits de l'industrie papetière


Boues de STEP urbaine


Compost de boues NFU 44-095 (mixte boue STEP et déchets verts)

Figure 8 : Planche photo des 11 matériaux modèles

II.2.c. Constitution d'une « rudothèque » sur la durée du programme SITERRE

Dans le but de constituer des lots de matériaux homogènes, de pouvoir échantillonner dans de bonnes conditions, et pouvoir revenir si nécessaire à la même source au cours du projet, les 11 matériaux ont été rassemblés sur une même plate-forme technique à Thorigné d'Anjou (Maine et Loire – plate-forme de l'entreprise Luc Durand) aménagée spécialement à cet effet. Les matériaux y sont protégés des intempéries par un géotextile.

Chaque matériau est collecté à hauteur de quelques mètres cubes, de manière à constituer si possible la seule base d'approvisionnement pour toute la durée du projet. NB, pour les matériaux les plus évolutifs, telles que les boues de step, un réapprovisionnement ponctuel aurait été prévu, mais n'a pas été nécessaire.

Ce site constitue la bibliothèque de matériaux du projet. C'est en quelque sorte une « rudothèque ».



Figure 9 : La « rudothèque » SITERRE en juin 2011

III. Caractérisation individuelle des matériaux modèles (=Tâche 2)

III.1. Echantillonnage sur le site de la « rudothèque »

Pour les prélèvements d'échantillons destinés aux analyses de laboratoire pour les tâches 2 et 3, l'échantillonnage a été réalisé de la façon suivante afin de donner à chacun un prélèvement représentatif et homogène pour de besoins en volumes parfois différents :

- constitution d'un tas à part d'1,5 m3 environ
- mélange de ce tas
- à cette étape, l'important est d'être homogène dans la distribution entre partenaires, en plus d'être représentatif. Prise par pelles successives à l'extérieur du tas et en tournant. Pour une zone du tas, il y a distribution à tous les partenaires. Seul diffère le nombre de pelletés par partenaire, en fonction de la taille d'échantillon qu'il a à prélever.

III.2. Matériels et méthodes

III.2.a. Propriétés mécaniques

Les matériaux ont été prélevés sur stock en quantité suffisante pour mener les essais, soit entre 100 et 200 kg selon leur nature.

Les essais ont été menés au plus proche des normes AFNOR, dans les limites de faisabilité compte tenu de leur origine non conventionnelle pour des matériaux de génie civil.

Les matériaux ont été séparés en matériaux granulaires grossiers (béton de démolition, mélange de déchets du bâtiment, déchets de fabrication des briques et ballasts) et matériaux fins (boues de STEP, sous-produits de l'industrie papetière et terres excavées). De par leur nature, le compost, les déchets verts, et les déchets provenant du nettoyage des rues n'ont pu être caractérisés (matériaux très hétérogènes, comportement incompatible avec les méthodes d'essais).

Trois types d'essais ont été réalisés :

- Essais géométriques
  - NF-EN933-1 et NF P : mesure de la granulométrie
  - NF EN 1097-6 Annexe A et NF P 94-054 : mesure de la masse volumique des grains
- Essais mécaniques
  - • NF EN 1097-2 : résistance à la fragmentation - Los Angeles
  - • NF EN 1097-1 : résistance à l'usure - Indice Micro Deval (MDE)
  - • NF P 94-093 et NF-P 94-078 : détermination de l'optimum Proctor et de l'Indice Portant Immédiat (IPI)
- Essai thermique et d'altération des granulats
  • NF EN 1367-1 : détermination de la résistance au gel/dégel.

Les essais géotechniques réalisés ont été sélectionnés selon la nature fine ou granulaire des matériaux :

- matériaux granulaires : taille des grains, masse volumique, essais de résistance mécanique (fragmentation et usure), gel/dégel ;
- matériaux fins : taille des grains, masse volumique et comportement au compactage.

Pour les matériaux granulaires grossiers :

- essai granulométrique : l'échantillon est plongé pendant 1h minimum dans l'eau puis lavé au tamis de 63 µm. Le tamisage de la fraction supérieur à 63 µm est réalisé à sec ;
- essai de masse volumique : les mesures sont réalisées sur la fraction 4/31 mm avec un pycnomètre de 1L, à l'eau distillée ;
- essais Los Angeles et MDE : le matériau est concassé dans un concasseur à mâchoires pour isoler une fraction 10/14 mm. L'échantillon est coupé en phase humide sur tamis de 10 mm et 14 mm, puis séché à 105°C ;
- essai de gel/dégel : les matériaux sont tamisés pour obtenir une fraction 16/32 mm, fraction granulométrique définie dans la norme NF EN 1367-1.

Pour les matériaux fins, au vue d'un comportement mécanique particulier de certains matériaux, les méthodologies d'essais ont été modifiées. Il s'agit des boues de STEP et des sous-produits de l'industrie papetière.
Dans le cas des boues de papeterie, après un séchage à 50°C, le matériau se structure sous forme d'agrégats de tailles comprises entre quelques mm et quelques cm particulièrement réfractaires à l'eau. Le malaxage est peu efficace au début, mais après des cycles d'immersion et malaxage, les agrégats se cassent et le matériau n'accepte plus d'eau.
Dans le cas des boues de STEP, le comportement du matériau est assez proche de celui des boues de papeterie, notamment concernant la difficulté d'imbiber le matériau par les procédures classiques de malaxage.

- **Essai granulométrique** : l'échantillon est plongé pendant 1h dans l'eau puis lavé au tamis de 80µm. Le tamisage de la fraction supérieure à 80 µm est réalisé à sec. Pour les boues de papeterie et les boues de STEP, le séchage créé des liaisons très fortes qui ne permettent pas de réaliser une granulométrie représentative. Il faudrait casser les agrégats en utilisant un défloculant. Par l'observation, nous pouvons cependant considérer que ces deux matériaux ont 100 % de leurs éléments inférieurs à 2 mm, et probablement inférieure à 80 µm.
- **Essai de masse volumique** : les mesures sont réalisées sur la fraction 0/80 µm à l'aide d'un pycnomètre de 20 mL, à l'eau distillée. Pour les boues de papeterie et les boues de STEP, la masse volumique est mesurée en plongeant le matériau séché (et aggloméré) à 50°C dans un pycnomètre de 1L (suivant la norme EN1796-6 annexe A).
- **Essai Proctor normal** : il s'agit de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau. Ces caractéristiques sont la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale. Le matériau est normalement humidifié à plusieurs teneurs en eau (5 minimum) dans un malaxeur. Il est ensuite compacté à l'aide d'une dame Proctor automatique (Figure 2a). Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe de variation de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.
- **Essai IPI** : il s'agit de mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau compacté (Figure 2b). L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés. Cette méthodologie est appliquée strictement pour la caractérisation des terres excavées. Pour les autres matériaux présentant des comportements particuliers, les sous-produits de l'industrie papetière et les boues de STEP, au moins trois points de teneur en eau ont été réalisés : état sec, état humide naturel, état saturé. En effet, leur aptitude au mélange avec l'eau est faible, il est donc difficile d'obtenir un mélange homogène pour une teneur en eau donnée.
- **Essai de gel/dégel** : Pour cet essai, nous dérogeons à la norme en réalisant des cycles de gel/dégel en utilisant un simple congélateur. La fraction 16/32 mm du matériau est placée dans un bac recouverte d'eau distillée (Figure 3), le bac étant lui-même couvert avec un couvercle. Par cycle de 24h, l'échantillon est congelé, puis décongelé à l'air ambiant. Pendant l'essai, 10 cycles sont ainsi réalisés. Après le dernier cycle, le matériau est lavé sur un tamis de 8 mm (d/2), séché à 110°C puis la masse finale est mesurée (M2).L'indice de sensibilité au gel/dégel est calculé suivant la formule F=100*(M1-M2)/M1, M1étant la masse initiale.


(a) Essai Proctor sur matériau sec


(b) Essai IPI sur matériau imbibé


(c) Empreinte après essai IPI sur matériau imbibé

Figure 10 : Essais Proctor et IPI sur les sous-produits de l'industrie papetière



Figure 11 : Essai de résistance au gel/dégel, échantillon gelé au cours d'un cycle

III.2.b. Composition chimique

Les déterminations en éléments totaux majeurs et traces ont été réalisées sur les fractions inférieures à 4 mm et inférieure à 2 mm obtenues après tamisage des échantillons de matériaux.

Eléments majeurs

La composition chimique des matériaux a été déterminée par spectrométrie d'émission (ICP-OES) selon la norme NF EN ISO 11885, après broyage des échantillons, calcination à 450°C pendant 2 heures, attaque chimique du résidu par les acides fluorhydrique et perchlorique concentrés ($HF\text{-}HClO_4$). Les teneurs en Si ont été évaluées après fusion alcaline. Les solutions ont été analysées après filtration sur membrane de 0,45 µm de porosité. Le taux de matière volatile (MV) à 450 °C pendant 3h a également été déterminé.

Eléments traces

Les teneurs en éléments traces ont été mesurées après dissolution des échantillons dans un mélange $HF\text{-}HClO_4$. Les solutions ont été analysées, après filtration sur membrane de 0,45 µm de porosité, par ICP-OES selon la norme NF EN ISO 11885, ou par ICP-MS.

Composés organiques

Les teneurs totales pour les 16 HAP, les PCBi et les hydrocarbures aliphatiques (HA) ont été déterminées sur les parties aliquotes des échantillons après extraction à chaud par fluide pressurisé (ASE) avec un mélange de solvant acétone/hexane, suivi d'un lavage à l'eau pour élimination des substances polaires.
Pour les HAP, les extraits ont été purifiés sur cartouche d'alumine et analysés par HPLC avec détecteur UV/Fluo (Modèle VARIAN Prostar 230/UV 330/Fluo 363).
Pour les PCB, les extraits ont été purifiés sur cartouche de florisil et analysés par GC/ECD (chromatographie gazeuse et détecteur à capture d'électrons Modèle VARIAN GC3800).
Pour les HA, les extraits ont été purifiés sur cartouche de florisil et analysés par GC/MS.

III.2.c. Caractérisation minéralogique

Préparation des échantillons

Dans un premier temps, la totalité des prélèvements recueillis sur la plateforme de regroupement (entre 5 et 15 kg selon les matériaux) a été séchée pendant 72h dans une étuve à 40°C.

En fonction de l'aspect des matériaux et en cohérence avec les essais géotechniques, les échantillons ont été préparés différemment selon qu'ils s'apparentent aux matériaux granulaires grossiers ou aux matériaux fins. Les boues papetières ayant pris en masse après séchage, malgré l'émottage humide, ont été concassés avant un premier passage sur tamis. Puis le refus a de nouveau été concassé avant un 2ème passage sur tamis. Les boues de STEP ont été concassées une seule fois, avant tamisage. La plupart des autres matériaux ont été passés directement sur tamis de 4 mm. L'ensemble des prétraitements réalisés pour chaque échantillon est présenté dans le Tableau 6. Les refus de tamis ont été quantifiés et sont également reportés dans le Tableau 4.

Les fractions fines ainsi obtenues ont ensuite été quartées afin d'obtenir des parties aliquotes de 1 kg chacune environ. Les mesures des CNAB ont été réalisées sur des prélèvements issus de ces parties aliquotes.

Afin d'accroitre la qualité des diffractogrames de rayons X par concentration de la fraction minérale, les fractions tamisées des matériaux les plus organiques ont subis un second prétraitement consistant en une séparation densimétrique dans l'eau.

Les 5 échantillons concernés par ce traitement sont les suivants :

- Compost NFU 44-095,
- Boues de STEP,
- Déchets verts,
- Boues papetières,
- Balayage de rues

Tableau 4 : Récapitulatif des traitements appliqués en vue de préparer une fraction <4 mm

Matériau	Poids du matériau après séchage (kg)	Humidité du jour du prélèvement (%)	Traitement appliqué	Fraction 0 - 4 ou 0 - 12.5 mm (kg / %)	Refus (kg / %)
Compost	**4.8**	**18.1**	Tamisage	**3.6 / 75**	**1.2 / 25**
Béton	**9.7**	**7.1**	Tamisage 4 mm	**5.2 / 66**	**2.7 / 34**
Boues STEP	**7.2**	**30.0**	Concassage + tamisage 4 mm	**4.95 / 69**	**2.2 / 31**
Déchets verts	**10.3**	**22.4**	Tamisage 12,5mm	**7.7 / 75**	**2.6 / 25**
Boues papetières	**4.9**	**40.7**	Emottage + tamisage + concassage du refus + tamisage 4mm	**4.55 / 93**	**0.35 / 7**
Pneus	**4.1**	**0.0**	Non traité	-	-
Balayage de rues	**7.4**	**26.2**	Tamisage 4 mm	**4.7 / 63**	**2.7 / 37**
Terre excavée	**11.4**	**15.4**	Tamisage 4 mm	**9.9 / 87**	**1.45 / 23**
Mélange bâtiment	**11.0**	**4.8**	Concassage + tamisage à 4 mm	**9.1 / 83**	**1.85 / 17**
Brique	**7.9**	**2.0**	Tamisage 4 mm	**4.7 / 48**	**5.00 / 52**
Ballast	**16.1**	**2.4**	Tamisage 4 mm	**3.35 / 21**	**12.75 / 79**

Pour chaque échantillon, un prélèvement d'environ 300 g secs a été mélangé avec de l'eau dans un grand bécher de 5 L. Les échantillons « Compost » et « Déchets verts » ont nécessité l'utilisation de 2 béchers.
L'ensemble a été mélangé soigneusement puis laissé au repos au moins une nuit. Lorsque la séparation entre les fractions de densité supérieure et inférieure à 1 s'est correctement effectuée, une tranche d'eau « claire » est visible au milieu du bécher. Les fractions « flottées » et « décantées » sont récupérées et séchées et, l'eau claire évacuée. Les fractions décantées ont ensuite été séchées et homogénéisées. Les résultats de cette séparation sont présentés en Tableau 7.

Tableau 5 : Bilan de la séparation densimétrique

Référence de l'échantillon	Masse totale traitée (g)	Fraction décantée		Fraction flottée	
		g	%	g	%
Compost NFU 44-095,	335,06	318,48	**95,05**	16,58	**4,95**
Boues de STEP,	289,84	278,28	**96,01**	11,56	**3,99**
Déchets verts,	276,75	191,80	**69,30**	84,95	**30,70**
Boues papetières,	348,31	347,70	**99,82**	0,61	**0,18**
Nettoyage de rues	299,06	272,06	**90,97**	27,00	**9,03**

Diffraction des rayons X

La fraction cristallisée des échantillons est déterminée par diffractométrie des rayons X à partir de leur diagramme de poudre. Pour cela, une partie aliquote d'environ 30 g des échantillons a été broyée jusqu'à une atteindre une granulométrie de quelques centaines de µm. Cette technique est surtout qualitative et ne peut donner qu'une indication semi-quantitative. Le seuil de détection est de l'ordre de 5%, mais peut largement varier en fonction de la nature des différentes phases.

La fraction phylliteuse des échantillons est déterminée par diffractométrie des rayons X à partir de lames orientées normales, glycolées pendant 12 heures en tension de vapeur puis chauffées à 490°C pendant 4 heures. Les proportions sont estimées à partir de l'aire des pics.

Détermination de la valeur de bleu de méthylène par essai à la tache (norme NF P 94-068)

Pour les essais d'adsorption au bleu de méthylène, une partie aliquote des échantillons issus des fractions 0-4 mm, décantés ou non, a été préalablement broyée en dessous de 2-3 mm puis, dispersée dans de l'eau et laissée au repos au moins 12h.

Mesure de la Capacité de Neutralisation Acido-Basique (CNAB)

La CNAB a été déterminée d'après la norme XP CEN/TS 15364 de septembre 2006. Le principe de cette mesure est particulièrement simple puisqu'il s'agit de mettre en contact quelques g de l'échantillon avec une solution contenant des protons ou des hydroxydes à des molarités connues. Toutefois, la méthode s'avère laborieuse en raison des essais à réaliser pour définir la gamme de molarité des solutions d'attaques. L'état d'équilibre est vérifié à la fin de la période d'extraction, la période totale de contact étant de 48h. Le pH est déterminé par électrochimie.

Au final, la détermination de la CNAB se fait en 3 étapes :
Préparation visant à définir la gamme de molarité des solutions avant attaques,
Mesure à proprement parlé (8 points au minimum sont requis pour élaborer la courbe de CNAB, espacés de manière homogène au moins entre pH 4 et 12),
Complément de mesure en cas de point manquant sur la courbe.

L'ensemble des flacons de 250 ml utilisés a été préalablement lavé à l'acide nitrique 10% puis rincé à l'eau déminéralisée. Les mesures ont été effectuées dans un rapport L/S de 10, soit 15 g d'échantillon équivalent sec et 135 ml de solution d'attaque. Cette dernière est ajoutée en 3 fois, précautionneusement, afin d'éviter une éventuelle réaction violente. Les flacons sont sous agitation constante pendant toute la durée de la mesure. L'équilibre est jugé atteint si le pH déterminé après 48h de contact n'a pas varié de plus de 0,3 unité pH par rapport à celui mesuré après 44h de contact. Dans le cas contraire, le contact est maintenu pour 24h supplémentaire.

Pour chaque valeur finale de pH, la quantité d'acide ajoutée est exprimée en moles de H^+/kg MS et la quantité de base ajoutée est exprimée en moles négatives de H^+/kg MS (-mol H^+/kg MS). Les moles par kilogramme nettes (+ pour les acides et – pour les bases) sont indiquées en fonction du pH.

III.2.d. Propriétés agronomiques

Les paramètres agronomiques des matériaux d'étude ont été caractérisés en appliquant des protocoles, normalisés pour la plupart, utilisés pour l'étude des sols « naturels ». Cependant, certaines méthodes appliquées sur les matériaux ont dues être adaptées voire modifiées. Pour les matériaux à forte proportion de matières organiques, les protocoles usuellement utilisés en horticulture pour l'étude des amendements du sol et supports de culture ont été appliqués.
On précisera les différentes adaptations qui ont dues être mise en place pour les mesures et les matériaux concernés.

Préparation des échantillons

Pour toutes les mesures qui ont été réalisées, un échantillon représentatif de chaque matériau a été prélevé par la méthode du quartage. Les échantillons ont ensuite été séchés à l'air sous une serre à une température n'excédant pas 35°C. Certaines mesures ont été réalisées sur une fraction de l'échantillon inférieure à 2 mm (exigence norme).

Description des matériaux

La caractérisation débute par une phase de description des matériaux se fondant sur des observations macro et microscopiques. Des photos à taille réelle ainsi qu'au microscope optique ont été réalisées. Des observations au microscope électronique à transmission (MET) ont également été réalisées et des clichés ont pu être pris.
La **couleur** est un caractère important et très significatif lors de la description des horizons de sols. En effet, la modification de couleur peut témoigner d'un changement dans les proportions d'un ou plusieurs constituants ou bien un changement de leur état. Ainsi la description de la couleur des matériaux technogéniques « seuls » pourra permettre d'identifier d'éventuels changements de couleurs lors de la mise en mélange des matériaux. Une référence est ainsi donnée à chaque matériau frais (dans les conditions de l'échantillonnage) et sec à l'aide d'une charte de couleur utilisée pour les sols (code Munsell®). Chaque référence décrit la teinte dominante de base et la clarté.

Etude morpho-analytique

Le concept de l'étude morpho-analytique repose sur l'évaluation de la disponibilité des éléments amendants et fertilisants (C, N, P, K, entre autres) présents dans les PRO utilisés en agriculture et en construction de sol. Il se base sur la corrélation entre les analyses physico-chimiques classiques (teneurs globales en éléments, cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote) et nos analyses de caractérisation (i) des phases solubles à l'eau (disponibilité des éléments C et N à court terme) et (ii) des phases solides des PRO (disponibilité des éléments amendants et fertilisants à plus long terme) en microscopie électronique à transmission couplée à l'analyse (MET-EDX).
Dans les phases solides des PRO, la disponibilité des éléments dans le temps est définie en fonction :

- de la nature des matières organiques (cellulose, lignines...) et leur niveau de transformation (fragmentation et humification),
- du potentiel microbien (actif ou latent),
- de la localisation des éléments,
- des associations organo-minérales éventuellement présentes dans les PRO.

Paramètres physiques

L'**humidité résiduelle** des échantillons a été déterminée à 105°C. Elle a été réalisée à la fois sur les échantillons non tamisés et ceux tamisés à 2mm, afin d'avoir les humidités respectives de caque fraction analysée. Suivant la norme NF ISO 11 465, les échantillons ont été séchés à 105 ± 5 °C jusqu'à masse constante. La différence de masse avant et après le processus de séchage sert de mesure pour la teneur en matière sèche et en eau. Cette teneur est exprimée en % en masse.

La **densité apparente** correspond au rapport de la masse sèche au volume de l'échantillon. Pour les matériaux technogéniques, il a semblé plus pertinent de suivre la norme NF En 13 041 utilisée pour la détermination des propriétés physiques des amendements du sol et de supports de culture. Cette mesure a été réalisée sur les matériaux séchés à l'air, non tamisés, à l'aide du dispositif présenté sur la Figure 12.



Figure 12 : Dispositif de mesure de densité apparente sur du ballast

La **densité réelle** correspond à la masse de la phase solide sur le volume de cette phase solide et exprime la densité des composants du sol. Elle a été mesurée en suivant la norme NF EN 13 042 au pycnomètre

(eau et/ou alcool). La mesure a été réalisée dans l'alcool pour les matériaux de nature plutôt organiques : compost, boues de STEP, déchets verts et déchets de balayage de rue. Les sous-produits papetiers ont pu être traités à l'eau en raison de leur potentiel à absorber l'eau comme on peut le voir sur la Figure 13.

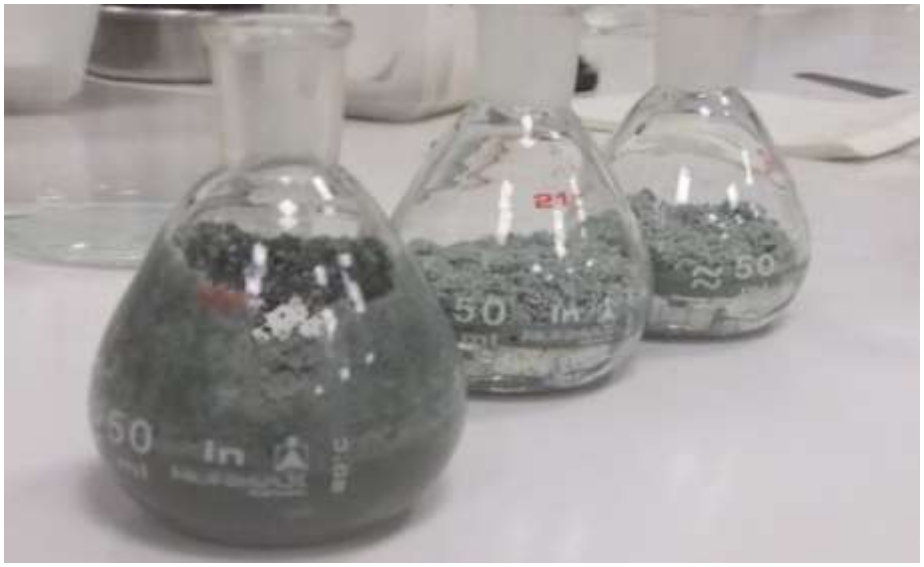


Figure 13 : Mesure de la densité réelle au pycnomètre sur les sous-produits papetiers à l'eau

Les humidités caractéristiques, ont été déterminées en suivant la norme NF ISO 11 464. Il s'agit de caractériser l'état du système terre/eau en mesurant la force avec laquelle la phase solide retient la phase liquide. La technique consiste à appliquer une pression de gaz inerte à un échantillon de terre humide afin d'extraire toute la phase liquide retenue dans un système d'extracteur à plaque de pression dans des presses à membrane (Bruant et al., 1996) (Figure 14). Les mesures correspondent au point de flétrissement (au-delà duquel les racines des plantes ne peuvent plus prélever l'eau) (pF4,2 soit 16 bars) et à la capacité au champ (au-dessous de laquelle il subsiste de l'eau gravitaire dans le sol) (pF 2,5 soit 0,33 bar). La différence entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement correspond à l'eau utile pour les plantes. Les valeurs sont exprimées en humidité massique.



Figure 14 : Mesure des humidités caractéristiques à l'aide de presses à membrane

La **conductivité hydraulique à saturation** a été mesurée à l'aide d'un infiltromètre à minidisque présenté sur la figure 7b après mise à saturation des échantillons (Figure 15a)**.** Le principe d'un infiltromètre consiste à mesurer le flux d'infiltration de l'eau dans le sol à travers la membrane poreuse située à la base de l'appareil. Afin de s'assurer que la surface de l'échantillon qui se met en contact de la membrane soit plane, on ajoute couramment une fine couche de sable sur une partie de l'échantillon avant de déposer l'infiltromètre (Coquet et al, 2000). La vitesse de succion a ici été appliquée à 2 cm. Dès la mise en contact de l'appareil sur l'échantillon, on mesure le volume d'eau dans l'infiltromètre pour des intervalles de temps régulier. Le volume est alors converti en hauteur d'eau infiltrée. Pour les calculs permettant d'aboutir à la valeur de conductivité hydraulique à saturation Ks en $cm.s^{-1}$, la méthode Zhang (1997) a été utilisée.



(a) (b)

Figure 15 : Mesure de la conductivité hydraulique : (a) mise à saturation des échantillons (b) mesure de la conductivité à l'aide de l'infiltromètre à minidisque

La **granulométrie** a été déterminée en suivant la norme NF X 31-107. Cette norme permet une détermination de la distribution granulométrique des particules de diamètre inférieur à 2 mm. Cette détermination est réalisée avec ou sans décarbonatation et permet de classer les particules en cinq fractions : les argiles (0 à 2 µm), les limons fins (de 2 à 20 µm), les limons grossiers (de 20 à 50 µm), les sables fins (de 50 à 200 µm) et les sables grossiers (de 200 à 2000 µm).

Fertilité chimique

En dehors de la détermination de la matière organique totale qui est réalisée sur des matériaux non tamisés, toutes les mesures chimiques sont réalisées sur les fractions tamisées à 2mm.

La **matière organique totale** est déterminée en suivant la norme NF U 44-170. La fraction de masse perdue par un échantillon est déterminée lors d'une calcination à 550°C. La fraction organique est exprimée en pourcentage massique, par calcul, le pourcentage massique de la fraction minérale est déduit.

Pour la suite des analyses réalisées, les protocoles ont été appliqués en fonction de la matrice principale (Tableau 6)

Tableau 6 : Matrices principales des échantillons considérées pour analyses chimiques

Désignation	matrice
Béton	Sol
Déchets de nettoyage des rues	Sol
Terres excavées	Sol
Déchets du bâtiment	Sol
Déchets de fabrication des briques	Sol
Ballasts	Sol
Boues de STEP	Boue
Sous-produits papetiers	Boue
Compost	Divers (éléments végétaux visibles)
Déchets verts	Divers (éléments végétaux visibles)

Le **carbone total** (organique+minéral) a été déterminé par combustion sèche. La méthode repose sur la transformation en dioxyde de carbone (CO_2) de la totalité du carbone présent dans l'échantillon. La réaction s'effectue en portant, une prise d'essai d'environ 50 mg broyé à 250 µm, à environ 1000°C en présence d'oxygène. Après séparation chromatographique, la quantité de CO_2 formée est quantifiée au moyen d'un catharomètre (conductibilité thermique). Le résultat est exprimé en $g.kg^{-1}$. Le protocole suit la norme NF ISO 10694.

L'**azote total** (organique et minéral) est déterminée en chauffant à environ 1000°C en présence d'oxygène, une prise d'essai d'environ 50 mg d'échantillon broyé à 250 µm. Les produits de combustion ou décomposition sont réduits à l'état d'azote moléculaire (N_2). Les quantités de N_2 formées sont quantifiées, après séparation chromatographique, au moyen d'un catharomètre. Le protocole suit la norme NF ISO 13878.

Le calcaire total, **$CaCO_3$ total**, est déterminé après acidification de l'échantillon, par une solution d'acide chlorhydrique. En présence de carbonates, il y a dégagement de dioxyde de carbone (CO_2) Le volume de CO_2 est ensuite mesuré à l'aide d'un dispositif appelé calcimètre de Bernard. En tenant compte de la masse de la prise d'essai, le volume de CO_2 mesuré est convertit en teneur de $CaCO_3$ exprimée en $g.kg^{-1}$. La méthode utilisée est décrite dans la norme NF ISO 10693. La prise d'essai est comprise entre 0,5 et 10 g d'échantillon broyé à 250 µm, selon la teneur en carbonates.

La mesure de calcaire actif, **$CaCO_3$ actif**, est réalisée selon la méthode Drouineau et Drouineau-Galet. Elle a été réalisée pour les teneurs en $CaCO_3$ total supérieures à 13 %. Il s'agit de déterminer la fraction de calcium insolubilisée après agitation du sol avec une solution d'oxalate d'ammonium. Les résultats sont exprimés en $g.kg^{-1}$ de $CaCO_3$. Selon les teneurs, des rapports d'extraction différents sont utilisés, 1/25 (m/v) pour la méthode Drouineau (quand la teneur est inférieure ou égale à 13 $g.100g^{-1}$), 1/100 (m/v) pour la méthode Galet (quand la teneur est supérieure à 13 $g.100g^{-1}$). Dans les deux cas la quantité d'oxalate résiduelle est dosée par titrimétrie en présence d'une solution de permanganate de potassium de titre connu (0,02 $mol.L^{-1}$). La méthode utilisée est décrite dans la norme AFNOR NF X 31-106. (Callot et al, 1980)

Le **pH eau** est mesuré après mise en suspension de l'échantillon de sol séché à l'air dans l'eau, avec un rapport 1/5 (v/v). La méthode utilisée est celle de la norme NF ISO 10390. La prise d'essai est d'environ 10 g d'un échantillon broyé à 2 mm.

La **CEC**, capacité d'échange cationique, correspond à la quantité de charges positives portées par les cations susceptibles d'être fixés, de façon réversible, sur les sites chargés négativement des constituants du sol. La détermination de la CEC selon la méthode de Metson (Metson, 1956) comprend trois étapes :

- saturation de l'échantillon en ions ammonium (NH_4^+) par percolations successives d'une solution d'acétate d'ammonium ($CH_3CO_2NH_4$) à 1 $mol.L^{-1}$.
- élimination de l'excès de NH_4^+ par percolations d'alcool éthylique
- échange des ions ammonium restant par une solution de chlorure de sodium à 1 $mol.L^{-1}$.

Les NH_4^+ déplacés sont dosés par colorimétrie sur la solution précédente après filtration. Les concentrations trouvées sont converties en cmol+/kg (centimoles de charges positives par kilogramme de sol). La méthode utilisée est décrite dans la norme AFNOR NF X 31-130. La prise d'essai est de 2,5 g de sol broyé à 2 mm.

Le **phosphore (P) assimilable** est déterminé selon la méthode Olsen (Olsen et al, 1954) décrite dans la norme NF ISO 11263. 2,5 g de sol broyé à 2 mm sont mis en suspension dans un réactif constitué de $NaHCO_3$ à 0,5 $mol.L^{-1}$ tamponnée à pH 8,5 par NaOH dans un rapport d'extraction de 1/20 (m/v). Le dosage du phosphore extrait s'effectue par spectrocolorimétrie à 825 nm après développement de la coloration d'un complexe phosphomolybdique selon le protocole décrit par Duval (Duval, 1963).

Les **teneurs en Si, Al et Fe extractible** ont été déterminé par la méthode Mehra Jackson (Mehra & Jackson, 1960) décrite dans la norme NF ISO 22036. 0,500 g d'échantillon broyé à 250 µm sont ajoutés à 25 mL d'une solution d'extraction (citrate de sodium à 0,267 $mol.L^{-1}$) + hydrogénocarbonate de sodium à 0,111 $mol.L^{-1}$) et 1,5 mL d'une solution réductrice de dithionite de sodium à 200 $g.L^{-1}$. Les dosages s'effectuent sur le filtrat par ICP-AES. Le fer est considéré comme traceur de l'évolution des sols. L'objectif visé est l'extraction d'une fraction plus ou moins importante du fer sous forme amorphe ou cristallisée non inclus dans un réseau silicaté (minéraux primaires ou argiles). Cette fraction est souvent appelée " fer libre ". L'aluminium et le silicium sont susceptibles de renseigner sur la nature des produits extraits.

III.2.e. Evaluation environnementale (tests de lixiviation, écotoxicologiques et pathogènes)

Test de lixiviation

Le potentiel polluant des matériaux a été évalué à l'aide d'un test de lixiviation en batch selon la norme NF EN 12457-2 (extraction simple à l'eau déminéralisée pendant 24 heures, rapport liquide/solide de 10 $L.kg^{-1}$). Les matériaux ont subi au préalable les prétraitements présentés dans le tableau 4.
Les concentrations en **éléments majeurs** et en **éléments traces** des éluats ont été déterminées, après filtration sur membrane de 0,45µm de porosité, par ICP-OES (NF EN ISO 11885).

Les **hydrocarbures** (C10-C40) ont été analysés par spectrométrie GC/FID selon la norme NF EN ISO 9377-2 et **l'indice phénol** par colorimétrie selon la norme NF T 90-109.
Les **chlorures**, **fluorures**, **sulfates** et **nitrates** ont été dosés par chromatographie ionique selon la norme NF EN ISO 10304. Les **nitrites** et les **phosphates** ont été dosés par colorimétrie selon les normes NF EN 26777 et NF EN ISO 6878.
Le **pH**, la **conductivité**, le **carbone total**, la **fraction soluble** des lixiviats, ont été déterminés selon les normes en vigueur sur la qualité des eaux, respectivement NF T 90-008, NF EN 27888, NF EN 1484, NF T 90-029.

Tableau 7 : Prétraitements appliqués sur les matériaux pour le test de lixiviation

Matériaux	Prétraitements		
	Pas de prétraitements	Tamisage à 4 mm sans broyage du refus à 4mm	Tamisage à 4 mm avec broyage du refus à 4mm
Compost NFU 44-095			X
Béton		X	
Boues de STEP			X
Déchets verts			X
Sous-produits de l'industrie papetière	X		
Déchets provenant du nettoyage des rues		X	
Terres excavées		X	
Mélange de déchets du bâtiment	X		
Déchets de fabrication des briques		X	
Ballasts		X	

Ecotoxicité

Les essais d'innocuité menés sont présentés selon les matériaux et la préparation du matériau dans le Tableau 8.

Tests de phytotoxicité Orge et Cresson
Le test est effectué avec un sol d'essai (substrat de référence décrit dans la norme ISO NF 11268-2). Les effets de 3 dilutions du produit étudié (12,5%, 25% et 50% v/v) sur le taux de germination et la production de biomasse aérienne (matière sèche) des deux plantes-test sont comparés à un témoin sur substrat seul. Quatre répétitions sont réalisées pour chaque traitement.

La germination et la croissance s'effectuent en phytotron, en conditions de température, de luminosité et d'humidité contrôlées. L'étude de l'émergence est effectuée 48h après que 70% des graines dans les pots témoins ont émergé. La récolte s'effectue généralement 21 jours après le semis. Les plantes sont récoltées, pesées (matière fraîche), séchées en étuve (40°C) puis pesées à nouveau (matière sèche).

Les critères d'effet mesurés sont l'émergence et la matière sèche pour chacune des plantes test. Ces tests ont été adaptés à partir de la norme AFNOR XP U 44-167 (2005).

Test d'évitement
L'objectif de cet essai est d'évaluer la fonction d'habitat des sols ainsi que l'influence des contaminants sur le comportement des vers de terre (ISO/FDIS 17512-1 (2008)). Cet essai constitue une méthode rapide qui reflète la biodisponibilité pour les espèces *Eisenia fetida* et *Eisenia andrei* des matériaux étudiés. Le comportement d'évitement constitue le critère d'effet de cet essai.

Dans un dispositif à deux compartiments contigus, dix vers de terre adultes sont exposés simultanément à un sol témoin (substrat de référence décrit dans la norme ISO NF 11268-2) et au produit testé ; les vers ont ainsi le choix entre ces deux substrats. Cinq réplicats sont réalisés pour chaque dilution testée. Après une exposition de 48h, un comptage des vers de terre présents dans chaque compartiment est réalisé.

Les effets de 3 dilutions du produit étudié dans le substrat de référence (12,5%, 25% et 50% v/v) ont été testés.

Tests de phytotoxicité Lemna minor

L'objectif est de déterminer la phytotoxicité d'un produit sur des lentilles d'eau sauvages (*Lemna minor*) selon la norme ISO 20079 (2005). Il s'agit de comparer, en conditions contrôlées, la croissance des frondes de populations de lentilles d'eau cultivées dans un milieu témoin à celle de populations placées dans des milieux contenant le produit à tester à différentes concentrations. Les essais ont été réalisés sur un lixiviat (EN 12457-2) de déchet brut.

Une gamme de dilutions des lixiviats est testée (dilution dans de l'eau distillée). Une même quantité de solution nutritive est apportée dans chaque modalité. De ce fait, la concentration testée la plus importante est de 90% de lixiviat. Seize frondes de lentilles d'eau sont repiquées dans un bécher contenant 150 mL de lixiviat ou de milieu de culture pour la modalité Témoin. Chaque modalité est répétée 6 fois. Les béchers sont placés dans une enceinte régulée avec des conditions optimales pour la croissance des lentilles d'eau. Un comptage du nombre de frondes totales, même naissantes, est effectué 7 jours après le repiquage. Les frondes sont mises à l'étuve afin de pouvoir mesurer la matière sèche produite.

Les critères d'effet mesurés sont le taux de croissance et la matière sèche après 7 jours de croissance.

Test de toxicité aiguë sur microcrustacé - Daphnia magna

Ce test permet d'évaluer la toxicité aiguë du produit étudié vis-à-vis d'un microcrustacé d'eau douce, selon la norme NF EN ISO 6341 (1996). Le test est réalisé sur un lixiviat (EN 12457-2:2001) du matériau brut. Après 24h et 48h, le taux d'immobilisation d'une population de daphnies adultes (*Daphnia magna*) repiqués dans les lixiviats est mesuré.

La sensibilité du matériel biologique est contrôlée par un test au bichromate de potassium qui permet de calculer une immobilisation corrigée tenant compte de l'état physiologique de la population de daphnies. Le pH du lixiviat peut être ajusté afin d'être compris entre 5,5 et 8,5.

Le critère d'effet mesuré est le taux d'immobilisation des daphnies après 24h et 48h.

Tableau 8 : Liste des essais d'innocuité menés selon les matériaux et préparation du matériau

Matériau	Daphnie	Évitement vers de terre	Essai de phytotoxicité	Lemna
Béton	Après lixiviation sur produit tamisé 4mm - ajustement du pH à 8,5	non	non	Après lixiviation
Bâtiment	Après lixiviation sur produit tamisé 4mm - ajustement du pH à 8,5	non	non	Après lixiviation
Briques	Après lixiviation	non	non	Après lixiviation
Ballast	Après lixiviation	non	non	Après lixiviation
Compost de boue	Après lixiviation	Après tamisage à 5 mm	Après tamisage à 5 mm	Après lixiviation
Déchets verts	Après lixiviation	Après tamisage à 4 mm	Après tamisage à 4 mm	Après lixiviation
Terre excavée 1	Après lixiviation	Après tamisage à 4 mm	Après tamisage à 4 mm	Après lixiviation
Terre excavée 2	non	non	non	Après lixiviation
Boue papeterie	Après lixiviation	Après tamisage à 4 mm	Après tamisage à 4 mm	Après lixiviation
Boue step séchée	Après lixiviation	Après tamisage à 10 mm	Après tamisage à 10 mm	Après lixiviation
Balayage de rue	Après lixiviation	Après tamisage à 5 mm	Après tamisage à 5 mm	Après lixiviation

Evaluation des agents pathogènes

La caractérisation des pathogènes (12 agents biologiques) a porté sur une part des matériaux individuels et des mélanges étudiés dans le cadre du programme ADEME-SITERRE : les cinq matériaux individuels les plus organiques et six mélanges.

Liste agents pathogènes caractérisés :
Salmonelles, *Listeria monocytogenes*, Larves de nématodes, Œufs de nématodes, Micro-organismes aérobies à 30 °C, Levures et moisissures, *Escherichia coli*, *Aspergillus*, Staphylocoques à coagulase, Entérocoques fécaux, *Clostridium perfringens* (formes végétatives), *Clostridium perfringens* (spores).

Les matériaux individuels caractérisés :
Boue papetières (SP), Boues de STEP (BS), Compost de boues normalisé NF U 44‑095 (CO), Déchets de balayage des rues (DR), Déchets verts broyés (DV).

III.3. Résultats et discussion

En parallèle de la présentation des résultats ci-après, la synthèse et le regroupement des résultats sous forme de tableau pour les différents matériaux modèles sont présentés en Annexe 5.

III.3.a. Propriétés mécaniques

Sur les 11 matériaux sélectionnés nous avons pu réaliser des essais de caractérisation géotechnique uniquement sur 7 d'entre eux. Les résultats des essais de caractérisation menés distinguent deux catégories de matériaux :

– Des matériaux granulaires à grains grossiers :
  - le béton,

- les mélanges de déchets du bâtiment,
- les déchets de fabrication des briques,
- les ballasts.

– Des matériaux fins :
  - les boues de STEP,
  - les sous-produits de l'industrie papetière,
  - les terres excavées.

Les autres matériaux non analysés ont été jugés trop particuliers pour une application des essais usuels, notamment en raison de la présence de fibres végétales en grande quantité dans le cas des composts, des déchets verts et des déchets provenant du nettoyage des rues.

La figure suivante présente les courbes granulométriques obtenues pour le béton, les terres excavées, le mélange de déchets du bâtiment, les déchets de fabrication des briques et le ballast.

Les figures 17, 18, 19 et 20 présentent les courbes Proctor et IPI pour les terres excavées, les boues de STEP et les sous produits de l'industrie papetière.

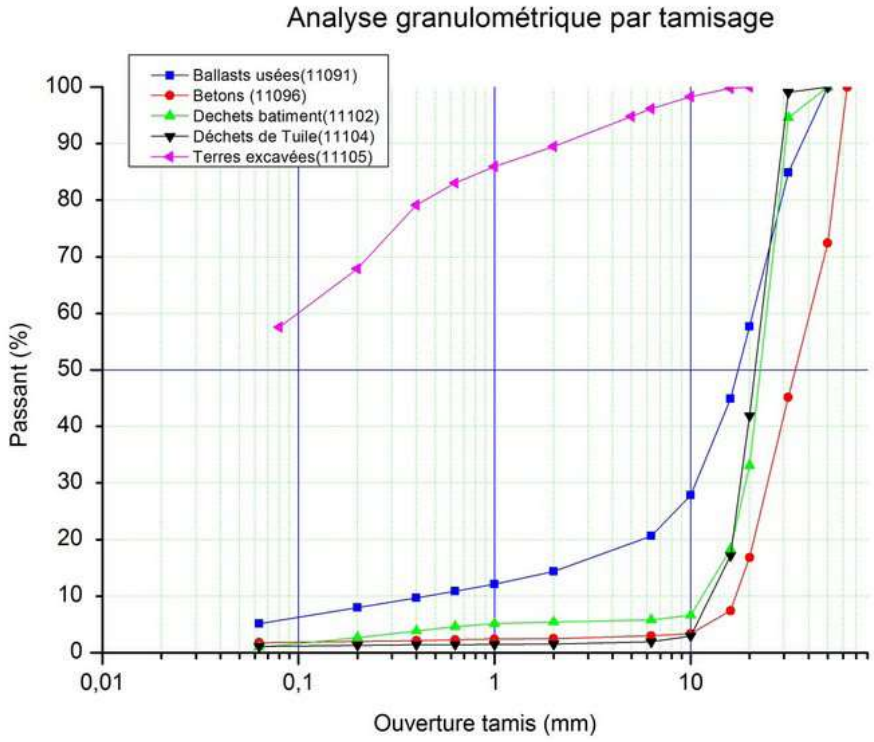


Figure 16 : Analyses granulométriques

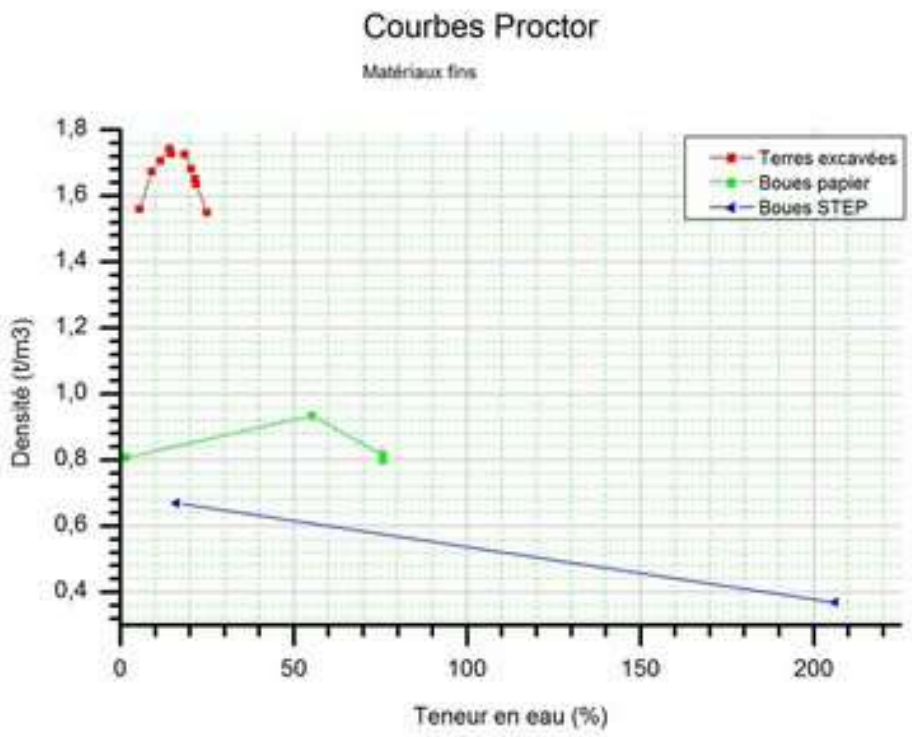


Figure 17 : Bilan comparatif des essais Proctor sur les terres excavées, les boues de STEP et les sous produits de l'industrie papetière

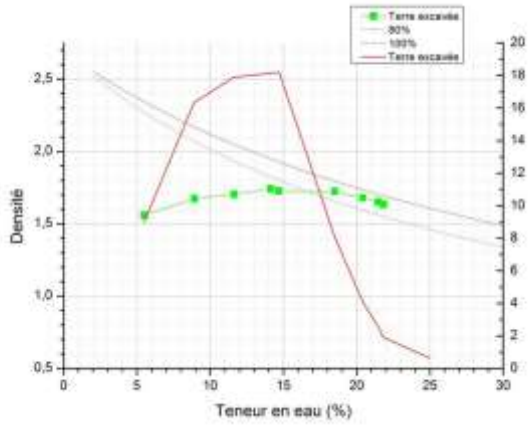


Figure 18 : Courbes Proctor et IPI des terres excavées

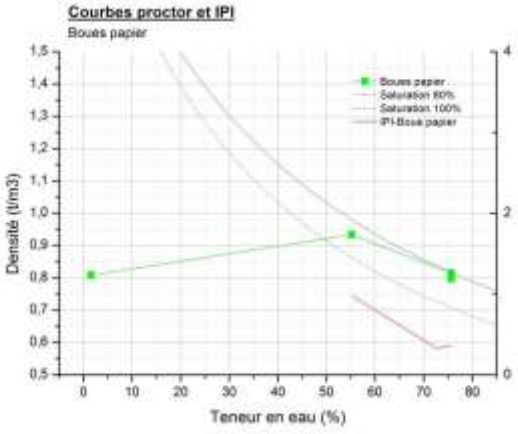


Figure 19 : Courbes Proctor et IPI des sous produits de l'industrie papetière

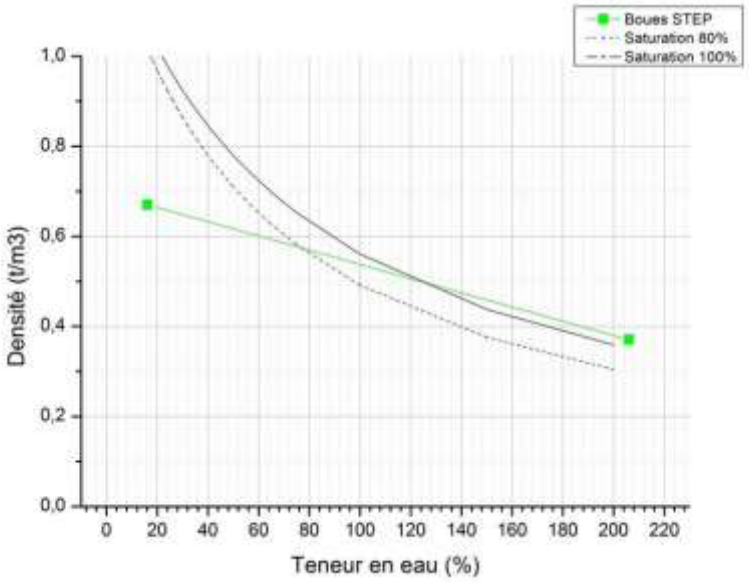


Figure 20 : Courbes Proctor et IPI des boues de STEP

Les résultats des cycles de gel/dégel sur les quatre matériaux testés sont présentés dans le Tableau 9.

Suivant la norme NF EN 1367-1, les essais montrent qu'il y a trois catégories de matériau identifiées :

- catégorie F1 (F<=1%) pour les ballasts et les déchets de fabrication de briques ;
- catégorie F2 (F<=2%) pour les déchets du bâtiment ;
- catégorie Fdeclared (F>4%) pour les bétons de démolition.

Trois des 4 matériaux peuvent être considérés comme résistant au gel/dégel pour l'utilisation en "Granulats pour béton (EN12620)", en "Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation (EN13043)" ou en "Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées (EN13242)" : le ballast, les déchets du bâtiment et les déchets de fabrication des briques.
Les bétons de démolition présentent une forte sensibilité aux cycles gel/dégel avec un indice supérieur à 4%.

Tableau 9 : Indice de résistance au gel/dégel suivant la norme EN1367-1

Matériau	Indice F (%)
Ballast	0,29
Bétons de démolition	7,79
Déchets du bâtiment	1,76
Déchets de fabrication des briques	0,31

Le résultat des essais de caractérisation mécaniques sont regroupés dans le Tableau 10. Les cases en grisé représentent les essais qui n'ont pas pu être réalisés sur le matériau correspondant.

Tableau 10 : Résultats des essais mécaniques

Paramètres	Unité	Compost NFU 44-095	Béton	Boues de step	Déchets verts	Sous produits de l'industrie papetière	Pneus usagés	Déchets provenant du nettoyage des rues	Terres excavées	Mélange de déchets du bâtiment	Déchets de fabrication des briques	Ballasts
Forme des grains (coef. applatissement)	-		nd							nd	nd	nd
Granulométrie (< 2 mm)	%		2.5	100		100			89.5	5.40	1.50	14.3
Masse volumique des grains	t/m3		2.5	1.28		2.14			2.69	2.46	2.44	2.95
Résistance à la fragmentation	Indice Los Angeles LA		32							24	47	13
Résistance à l'attrition et l'usure	Indice Micro Deval MDE		26							25	73	17
Proctor (5 points)	$\rho\delta_{OPN}$ (g/cm^3) w_{OPN} (%)			<1 / >50		<1 / >40			1.72 / 15			
IPI	Indice (cf GTS)			≈ 1		≈ 1			18			
Comportement au gel	%		7.79							1.8	0.31	0.29

Les résultats des essais mécaniques permettent de tirer les conclusions suivantes :

Pour les matériaux grossiers :

Bétons de démolition
Le matériau est composé d'agrégats de béton grossier, soit un assemblage de roche et de ciment hydraté, avec 93 % des éléments compris entre 16 et 63 mm pour une densité des grains secs de 2,5. La résistance mécanique à la fragmentation et l'abrasion ne sont pas très élevées, avec respectivement des valeurs de 32 (LOS) et 26 (MDE). Le matériau est sensible aux cycles gel/dégel. C'est le matériau présentant les plus gros éléments.

Mélange de déchets du bâtiment
Le matériau est composé d'un mélange d'éléments de différentes natures : plâtre, béton, brique/tuile, granulats + liant bitumineux. 94 % des éléments sont compris entre 10 et 50 mm, pour une densité des grains de 2,46. La résistance mécanique à la fragmentation et l'abrasion sont moyennes, avec respectivement des valeurs de 24 (LOS) et 25 (MDE). La résistance au gel est bonne.

Déchets de fabrication des briques
Le matériau est composé d'une seule nature, de la brique. 94 % des éléments sont compris entre 3 et 31 mm, essentiellement de forme plate. La densité des grains est de 2,44. La résistance mécanique à la fragmentation et l'abrasion sont très faibles, avec respectivement des valeurs de 47 (LOS) et 73 (MDE). Ce sont donc des matériaux très sensibles mécaniquement. La résistance au gel est bonne.

Ballasts
Le matériau est composé d'une seule nature rocheuse. 90 % des éléments sont compris entre 400 µm et 50 mm. C'est le matériau grossier qui contient le plus de particules fines. La densité des grains est élevée, 2,95. La résistance mécanique à la fragmentation et à l'abrasion sont élevées, avec respectivement des valeurs de 13 (LOS) et 17 (MDE). La résistance au gel est bonne.

Pour les matériaux fins :

Boues de STEP
Ce sont des matériaux composés de particules très fines, dont 100 % sont inférieures à 2 mm, qui tendent à s'agglomérer lors du retrait de l'eau. L'essai granulométrique n'a pu être réalisé car il faudrait utiliser un défloculant pour pouvoir séparer les particules. Dès que le matériau est séché, les particules s'agglomèrent pour former des agrégats plus ou moins gros. Plus facile à hydrater que les boues de papeterie, ce sont des matériaux hydrophobes à l'état sec, mais ils peuvent se saturer en eau plus rapidement. La masse volumique des grains secs est faible, 1,28 t/m^3. Par ailleurs, le matériau dégage une forte odeur désagréable lorsqu'il contient de l'eau et lors des phases de séchage. Les essais Proctor et IPI ont pu être partiellement réalisés, ils montrent un matériau se saturant avec plus de 80 % de teneur en eau, pour une densité de compactage assez faible, inférieure à 1. Comme pour les boues de papeterie, la difficulté pour l'imbiber à différentes teneurs en eau n'a pas permis d'obtenir un optimum précis. L'optimum se situe probablement pour une teneur en eau comprise entre 40 et 60 %, avec une densité estimée à l'optimum voisine de 0,6.

Terres excavées
Il s'agit d'un matériau fin typique du terrassement. C'est un sol à caractère micaschisteux, mélange de minéraux et de fragments de roche, et contenant des boules argileuses. 90% des particules sont inférieures à 2 mm. La densité des grains est de 2,69. Les données à l'optimum Proctor sont de 15 % pour la teneur en eau optimum et une densité de 1,72. On notera que la mise en eau passe par un malaxage qui désagrège les éléments les plus fragiles du matériau (notamment les morceaux de schiste). L'IPI est de 18. Compte-tenu de ces éléments, il apparaît que le matériau est traficable à l'optimum Proctor en Classe A.

Sous-produits de l'industrie papetière
Ce sont des matériaux composés de particules très fines, 100 % sont inférieures à 2 mm, et qui tendent à s'agglomérer lors du retrait de l'eau. L'essai granulométrique n'a pu être réalisé car il faudrait utiliser un défloculant puissant pour pouvoir séparer les particules. Dès que le matériau est séché, les particules s'agglomèrent pour former des agrégats plus ou moins gros particulièrement résistants, sachant que la phase d'imbibition est très compliquée compte tenu du caractère plutôt hydrophobe du matériau. Il faut en effet plusieurs dizaines d'heures d'immersion complète pour arriver à saturer le matériau en eau. La masse volumique des grains secs est plus faible qu'un sol naturel, 2,14 t/m^3. Le matériau dégage une forte odeur désagréable, notamment lors des phases de séchage. Les essais Proctor et IPI ont pu être partiellement réalisés et montrent un matériau se saturant avec plus de 60 % de teneur en eau, pour une densité de compactage assez faible, inférieure à 1. La difficulté pour l'imbiber à différentes teneurs en eau n'a pas

permis d'obtenir un optimum précis. Il faut faire sécher le matériau naturellement pour faire baisser la teneur en eau, mais cela est très long et le séchage n'est pas homogène (plus rapide en surface). L'optimum se situe probablement entre 30 et 50 % de teneur en eau avec une densité estimée à l'optimum voisine de 1.

Les essais de caractérisation mécanique réalisés permettent de juger la nature et l'utilisation potentielle des différents matériaux :

Pour les matériaux grossiers :

- Le ballast testé est un excellent matériau avec de très bonnes caractéristiques mécaniques. Néanmoins, sa nature peut varier suivant les sources d'approvisionnement, et notamment sa densité.
- Les bétons de démolition et les déchets du bâtiment présentent des caractéristiques proches avec des résistances mécaniques moyennes. Les déchets du bâtiment peuvent poser des problèmes en raison de leur hétérogénéité (plusieurs natures minérales). Les bétons sont sensibles au gel/dégel.
- Les déchets de brique sont les plus fragiles mécaniquement, mais leurs caractéristiques pourraient ne pas être si défavorables au sein d'un mélange.
- Les déchets de pneus, non testé dans cette étude, sont des matériaux déjà utilisés avec succès pour renforcer des remblais.

Pour les matériaux fins :

- Les terres excavées présentent des caractéristiques favorables avec une bonne aptitude au compactage à l'optimum, et une bonne traficabilité. Un traitement adapté pourrait renforcer leur comportement mécanique.
- Les sous-produits de l'industrie papetière sont moins facile à manipuler. Hydrophobe à l'état sec, difficile à hydrater, ces matériaux développent également une forte odeur. Mécaniquement, c'est un matériau très plastique lorsqu'il est hydraté, et donc avec une très faible portance (IPI inférieur à 1, un IPI minimum de 6 est nécessaire pour la traficabilité).
- Comme pour les sous-produits de l'industrie papetière, les boues de STEP dégagent une forte odeur désagréable lorsqu'elles sont humides et en phase de séchage. Elles sont également difficiles à hydrater lorsqu'elles sont sèches. L'indice IPI est probablement inférieur à 1, donc peu favorable à la traficabilité.

III.3.b. Composition chimique

Les analyses ont été effectuées sur les fractions inférieures à 4 et 2 mm des échantillons de matériaux. Du fait de leur nature complexe et hétérogène, le mélange de déchets du bâtiment n'a pas été analysé.

Les analyses ont été réalisées sur des échantillons différents de ceux caractérisés pour leur comportement mécanique, notamment en ce qui concerne la fraction granulométrique. Le Tableau 11 présente la distribution granulométrique des échantillons analysés (fractions obtenues par tamisage à sec).

Tableau 11 : Distribution granulométrique des échantillons analysés (% sec)

Référence de l'échantillon	<1mm	<2mm	<4mm	>4mm
Compost NFU 44-095 0-20 mm	37	54	71	29
Béton 0-16 mm	47	70	96	4
Boues de STEP	16	18	31	69
Déchets verts 0-20 mm	26	46	75	25
Sous produits de l'industrie papetière	100	100	100	0
Balayage de rue 0-12 mm	21	37	75	25
Terres excavées 0-10 mm	90	92	95	4
Déchets de fabrication de briques 0-12mm	30	40	52	48
Ballasts 0-63 mm	37	45	58	42

Eléments majeurs

Les résultats des analyses sur la fraction inférieure à 2 mm sont présentés sur le Tableau 12. Ceux de la fraction inférieure à 4 mm sont présentés sur le Tableau 13.

Tableau 12 : Eléments majeurs (mg/kg) et matières volatiles à 450°C (%). Résultats pour la fraction inférieure à 2 mm

	Compost	Béton	Boues de STEP	Déchets verts	Boue de papeterie	Nettoyage des rues	Terres excavées	Briques	Ballast
MV%	44.0	2.5	64.9	56.2	25.1	14.6	2.2	0.6	2.8
Si	170530	359225	24270	150830	31160	295950	369530	325560	250170
Al	34780	39159	10910	15109	24673	42625	85756	75511	77028
Fe	22016	20596	64830	8745	1292	30089	31718	35900	98212
Mn	468	407	115	218	41	409	118	179	1510
Ti	1167	1318	673	494	568	2549	1409	2087	8130
Mg	5665	4376	5431	2993	4091	10810	4742	4123	31067
Ca	29074	64676	26210	22660	252214	38398	694	59802	51400
Na	7738	6222	1987	2063	150	14160	690	905	21192
P	9237	539	41662	2525	347	875	120	296	1137
K	17557	15809	8344	15998	876	11905	25510	13642	7369

Tableau 13 : Eléments majeurs (mg/kg) et matières volatiles à 450°C (%). Résultats pour la fraction inférieure à 4 mm

	Compost	Béton	Boues de STEP	Déchets verts	Boue de papeterie	Nettoyage des rues	Terres excavées	Briques	Ballast
MV%	35.6	2.9	66.3	67.8	25.1	22.7	2.2	0.5	2.7
Si	207640	361950	26910	84060	31160	254960	364130	337535	262380
Al	41341	40237	10850	9828	24673	44417	85789	80679	78470
Fe	24876	21895	61324	7344	1292	32762	34760	36008	92532
Mn	496	430	110	168	41	437	119	180	1443
Ti	1473	1342	988	371	568	2776	1422	2630	7925
Mg	6367	4276	5317	2329	4091	12720	4760	4199	30727
Ca	26212	63848	25236	23515	252214	43007	695	53112	52073
Na	9366	6850	1912	1333	150	14830	660	939	21770
P	7952	527	40800	2097	347	1006	120	279	1035
K	17885	15901	8103	14311	876	10627	26000	14306	7409

Compost NFU 44-095
Le compost contient une fraction organique importante, le taux de matières volatiles varie entre 44 % pour la fraction inférieure à 2 mm et 35,6 % pour la fraction inférieure à 4 mm. Les concentrations en éléments minéraux majeurs sont plus importantes dans la fraction inférieure à 4 mm du fait de la moindre présence de matières organiques, sauf pour le calcium et le potassium. La fraction minérale contient principalement du silicium (36,5% du matériau total en SiO_2 dans la fraction < 2mm), de l'aluminium (6,5 % en Al_2O_3), du calcium (4 % en CaO) et du fer (3,1 % en Fe_2O_3).

Bétons de démolition
Le taux de matières volatiles est faible dans le béton, moins de 3 %. Les concentrations en éléments majeurs sont proches pour les 2 coupures granulométriques, environ 79 % de SiO_2, 7,4% de Al_2O_3 et 9 % de CaO.

Boues de STEP
Les boues de STEP contiennent plus de 65 % de matières organiques dans les 2 fractions étudiées. Les concentrations en éléments majeurs sont proches dans ces 2 fractions et représentent 9,5 % de P_2O_5, 9,3 % de Fe_2O_3, 5,2 % de SiO_2 et 3,6 % de CaO dans la fraction inférieure à 2mm.

Déchets verts
Les déchets verts présentent également une fraction volatile importante, 56,2 % dans la fraction inférieure à 2 mm et 67,8 % dans la fraction inférieure à 4 mm (présence d'éléments végétaux grossiers dans cette fraction). Comme pour le compost, les teneurs en éléments majeurs sont moins importantes dans la fraction grossière. La fraction minérale contient principalement du silicium (32,3 % en SiO_2 du matériau total dans la fraction inférieure à 2mm) et du calcium (3,2 % en CaO).

Sous-produits de l'industrie papetière
Les boues de papeterie sont des matériaux très fins en totalité inférieurs à 2 mm. Le taux de matière volatile est de 25,1 % et les éléments majeurs présents sont principalement le calcium (35,3 % en CaO), le silicium (6,7 % en SiO_2) et l'aluminium (4,7 % en Al_2O_3).

Déchets provenant du nettoyage des rues
Le taux de matières volatiles varie de 14,6 % dans la fraction inférieure à 2mm à 22,7 % % dans la fraction inférieure à 4mm, ce qui semble indiquer la présence de matériaux grossiers plus organiques dans cette dernière fraction. Ce matériau contient principalement du silicium (63,4 % en SiO_2 dans la fraction inférieure à 2 mm), peut-être en raison de la présence de sable, de l'aluminium (8 % en Al_2O_3), du calcium (5,4% en CaO) et du fer (4,3 % en Fe_2O_3).

Terres excavées
Les terres excavées sont des matériaux fins (92 % < 2mm) et il y a peu de différence entre les analyses réalisées sur les 2 fractions granulométriques. Le taux de matières volatiles est peu élevé, 2,2 % pour les 2 fractions analysés. Le matériau est essentiellement constitué de silicium (79,2 % en SiO_2 dans la fraction inférieure à 2 mm), de l'aluminium (16,2 % en Al_2O_3), du fer (4,5 % en Fe_2O_3) et du potassium (3 % en K_2O).

Déchets de la fabrication des briques
Le matériau est très homogène et contient très peu de matières volatiles, de l'ordre de 0,6 %. Il contient principalement du silicium (69,8 % en SiO_2 dans la fraction inférieure à 2 mm), de l'aluminium (14,2 % en Al_2O_3), du calcium (8,4 % en CaO) et du fer (5,1 % en Fe_2O_3).

Ballast
La fraction granulométrique du ballast étudié est également très homogène et contient 2,8 % de matières volatiles dans la fraction inférieure à 2 mm. Cette fraction est constituée de silicium (53,6 % en SiO2), d'aluminium (14,5 % en Al_2O_3), de fer (14 % en Fe_2O_3), de calcium (7,2 % en CaO), de magnésium (5,2 % en MgO) et de sodium (2,8 % en Na_2O).

Eléments traces

Les éléments traces ont également été déterminés sur les fractions inférieures à 2 mm (Tableau **14**) et inférieure à 4 mm (Tableau 15) des échantillons prélevés sur le stock.

Tableau 14 : Eléments traces (mg/kg). Résultats des analyses de la fraction inférieure à 2 mm

	Compost	Béton	Boues de STEP	Déchets verts	Boue de papeterie	Nettoyage des rues	Terres excavées	Briques	Ballasts
Sb	<2.0	3.6	4.5	<2.0	<2.0	5.6	2.7	<2.0	8.6
Ba	275	351	347	146	32	297	376	218	132
Mo	1.6	0.63	4.2	1.0	0.73	2.4	<0.40	1.0	3.3
Se	2.0	<1.0	<1.0	1.2	<1.0	3.5	<1.0	1.0	<1.0
Pb	33	36	28	31	11	53	17	29	23
Zn	250	140	494	106	14	203	63	60	150
Cr	32	33	20	17	13	52	59	55	111
Cu	104	46	225	26	54	70	24	19	88
Cd	0.44	0.28	1.3	0.17	0.10	0.18	<0.10	<0.10	0.36
As	15	8.3	4.2	4.7	<1.0	7.9	11	28	20
Hg	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	16	16	28	7.9	7.9	30	32	19	34

Tableau 15 : Eléments traces (mg/kg). Résultats des analyses de la fraction inférieure à 4 mm

	Compost	Béton	Boues de STEP	Déchets verts	Boue de papeterie	Nettoyage des rues	Terres excavées	Briques	Ballasts
Sb	<2.0	12	2.9	<2.0	<2.0	4.6	2.6	2.3	6.3
Ba	290	326	346	111	32	247	368	228	131
Mo	1.4	0.72	4.4	1.7	0.73	1.5	<0.40	0.96	2.7
Se	3.7	1.4	<1.0	1.4	<1.0	1.3	<1.0	1.4	<1.0
Pb	30	746	28	13	11	30	18	27	20
Zn	225	139	487	85	14	189	65	62	135
Cr	34	31	20	18	13	53	58	59	104
Cu	88	35	226	23	54	56	25	19	78
Cd	0.28	0.17	1.4	0.15	0.10	0.19	<0.10	<0.10	0.29
As	9.3	9.6	4.0	4.4	<1.0	4.3	12	27	21
Hg	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	16	16	27	6.4	7.9	24	33	20	31

Tableau 16 : Valeurs de référence pour les sols et les boues

	Arrêté du 8/01/98		RMQS 2011		
	Sols	**Boues**	**1er décile**	**Médiane**	**9^{e} décile**
Mo	-	-	0.3	0.6	1.5
Pb	100	800	16.6	27.9	49.6
Zn	300	3000	27.5	63.6	127
Cr	150	1000	19.1	48.6	89.2
Cu	100	1000	5.1	13.9	35.7
Cd	2	20	0.07	0.20	0.62
As	-	-	-	8.3*	15.1*
Hg	1	10	-	0.05	0.11
Ni	50	200	5.9	19.4	46.1

* Référentiel pédogéochimique du Nord-Pas-de-Calais

Le Tableau 16 présente des valeurs de référence pour les sols (fraction inférieure à 2 mm). Il s'agit d'une part des valeurs maximales admissibles pour les sols et les boues dans le cadre de l'utilisation en agriculture

des boues résiduaires urbaines fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998, et d'autre part des valeurs établies par le GIS Sol dans le cadre du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS).

Les concentrations en éléments traces sont généralement proches pour les 2 fractions étudiées, sauf dans le cas du plomb pour les bétons où la fraction inférieure à 4 mm a pu être contaminée par un matériau à base de plomb.
Les concentrations en éléments traces sont légèrement supérieures dans la fraction inférieure à 2 mm pour les déchets verts et les produits provenant du nettoyage des rues, probablement du fait de la présence de déchets végétaux ou de macro-déchets faiblement contaminés dans les fractions grossières de ces 2 matériaux
La discussion suivante portera donc sur la fraction inférieure à 2 mm :

Compost NFU 44-095
Les concentrations en éléments traces dans le compost sont assez élevées pour le zinc, le cuivre et l'arsenic, mais sans dépasser les valeurs réglementaires pour les sols agricoles.

Bétons de démolition
Les concentrations en contaminants sont très faibles, seule la concentration en plomb dans la fraction inférieure à 4 mm est anormalement élevée.

Boues de STEP
Les boues de STEP sont contaminées par le zinc, le cuivre et le cadmium. Les teneurs en zinc et cuivre dépassent les valeurs admissibles pour les sols agricoles mais sont inférieures aux seuils pour les boues. La concentration en molybdène apparaît également élevée par rapport aux valeurs des sols du RMQS

Déchets verts
Mis à part le zinc, les teneurs en éléments traces sont faibles dans les déchets verts.

Sous-produits de l'industrie papetière
Les boues de papeterie sont les matériaux qui contiennent les teneurs les plus faibles en éléments traces. A part le cuivre, toutes les valeurs sont comprises dans les valeurs des sols du RMQS.

Déchets provenant du nettoyage des rues
Ces déchets sont contaminés par le plomb, le zinc, et le cuivre. Cette contamination est typique des eaux de ruissellement en milieu urbain et peut être mise en relation avec la pollution liée au trafic routier et aux matériaux de construction des bâtiments, en particulier des toitures. Néanmoins les teneurs en ces éléments ne dépassent pas les valeurs réglementaires pour les sols agricoles. Les concentrations en molybdène et surtout en sélénium sont également plus élevées que pour la plupart des autres matériaux.

Terres excavées
Comme pour les boues de papeterie, les concentrations en éléments traces sont très faibles dans les terres excavées et sont comprises dans les valeurs des sols du RMQS.

Déchets de la fabrication des briques
Mis à part la concentration en arsenic qui est assez élevée (28 mg/kg), toutes les concentrations en éléments traces sont comprises dans les valeurs des sols du RMQS.

Ballast
Le ballast présente des concentrations plutôt élevées en zinc, chrome, cuivre, molybdène et arsenic. Les valeurs dépassent en effet le 9^{e} décile des valeurs du RMQS. La concentration en antimoine est également la plus élevée de tous les matériaux testés.

En conclusion, les matériaux testés apparaissent généralement faiblement contaminés par les éléments traces. Les teneurs les plus élevées concernent notamment le cuivre et le zinc, éléments par ailleurs faiblement toxiques. On notera la présence d'arsenic dans les briques, le ballast et le compost, ainsi que la présence d'antimoine dans le ballast.
Les boues de STEP, le compost et les produits de nettoyage des rues sont les matériaux qui concentrent le plus de polluants, tandis que les boues de papeterie et les terres excavées sont les matériaux les moins contaminés.

Composés organiques

Le Tableau 17 présente les résultats des analyses de PCB (7 congénères). Les concentrations sont généralement faibles, inférieures à la limite de quantification (0,015 mg/kg), sauf pour le ballast pour 2 congénères (138 et 153). La somme des concentrations en PCB reste toujours inférieure à la valeur limite fixée pour les déchets inertes (1 mg/kg).

Tableau 17 : Résultats des analyses de PCB (mg/kg)

	Congénère 101	Congénère 118	Congénère 138	Congénère 153	Congénère 180	Congénère 28	Congénère 52
Compost	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
Béton	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
Boues de STEP	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
Déchets verts	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
Boues de papeterie	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
Nettoyage des rues	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
Terres excavées	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
Déchets du bâtiment	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
Briques	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
Ballasts	<0.015	<0.015	0.019	0.016	<0.015	<0.015	<0.015

Les résultats des analyses de HAP (16 molécules) sont présentés dans le Tableau 18.

Mis à part le ballast, qui contient des teneurs significatives notamment en pyrène, fluoranthène, benzo(a)fluoranthène et chrysène, les concentrations en HAP sont généralement faibles dans les matériaux testés : la somme des concentrations des 16 HAP est inférieure à 2,5 mg/kg et les concentrations les plus élevées sont mesurées dans le béton (< 2,5 mg/kg) et le compost (< 1,6 mg/kg).

La somme des 16 HAP est inférieure à 21 mg/kg et reste donc inférieure à la teneur limite admissible pour les déchets inertes (50 mg/kg). Ces teneurs sont également inférieures au seuil de référence pour l'épandage des boues en milieu agricole (arrêté du 8 janvier 1998). Les valeurs des rapports des concentrations pyrène/anthracène (<10) et fluoranthène/pyrène (>1) montrent que ces HAP seraient d'origine « pyrolytique ». Une source potentielle des HAP sur les ballasts pourrait en effet être liée au traitement des traverses en bois par la créosote, produit contenant plus de 85% de HAP et largement utilisé dans le passé.

Tableau 18 : Résultats des analyses de HAP (mg/kg)

	Compost	Béton	Boues de STEP	Déchets verts	Boue de papeterie	Nettoyage des rues	Terres excavées	Déchets du bâtiment	Briques	Ballast
Acénaphtylène	0.297	<0.1	<0.1	0.119	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Acénaphtène	<0.01	0.022	0.014	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.087
Anthracène	0.014	0.053	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.028	<0.01	0.176
Benzo (a) anthracène	0.079	0.159	<0.05	0.091	<0.05	<0.05	<0.05	0.100	<0.05	1.329
Benzo (a) pyrène	0.118	0.232	0.072	0.111	<0.01	0.036	<0.01	0.113	<0.01	1.017
Benzo (a) fluoranthène	0.150	0.290	0.089	0.146	<0.05	0.072	<0.05	0.141	<0.05	2.503
Benzo (ghi) pérylène	0.108	0.173	0.057	0.083	<0.01	0.035	<0.01	0.061	<0.01	0.528
Benzo (k) floranthène	0.067	0.130	0.047	0.063	<0.01	0.028	<0.01	0.056	<0.01	1.098
Chrysène	0.096	0.160	0.059	0.094	0.025	0.067	<0.01	0.093	<0.01	2.069
Dibenzo (ah) anthracène	0.013	0.016	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.072
Fluoranthène	0.141	0.338	<0.1	0.163	<0.1	0.119	<0.1	0.214	<0.1	5.595
Fluorène	0.110	0.041	<0.01	0.02	0.351	0.011	<0.01	<0.01	<0.01	0.115
Indéno pyrène	0.105	0.152	0.082	0.100	<0.01	0.014	<0.01	0.080	<0.01	0.687
Naphtalène	0.022	0.033	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.013	<0.01	0.260
Phénanthrène	0.138	0.229	0.062	0.109	0.251	0.068	<0.01	0.156	<0.01	1.283
Pyrène	0.113	0.353	0.114	0.146	<0.1	<0.1	<0.1	0.167	<0.1	4.120

III.3.c. Caractérisation minéralogique

Diffraction des rayons X

Les synthèses des résultats DRX sont présentées Tableau 19 et Tableau 20. Ces résultats qualitatifs, confirment le caractère alcalin de ces matériaux, dans le sens où la calcite est identifiée dans la quasi-totalité des échantillons (sauf boue de STEP et terre excavée).

Des particularismes se distinguent très nettement en rapport avec l'origine des matériaux comme la présence de kaolinite et de calcite en fortes proportions dans la boue papetière (qui entrent dans le procédé de fabrication), la présence de gypse dans le béton et les déchets du bâtiment, ou encore de vivianite (phosphate de fer(II)) dans les boues de STEP.

L'absence d'argiles gonflantes de type smectite dans la quasi-totalité des matériaux est également à noter (Tableau 20). Ce résultat était également attendu compte tenu de l'origine des matériaux sauf peut-être pour la terre excavée. Cette dernière se trouve être une altérite de schistes d'où la présence de micas, phases primaires non altérées, et d'illite, qui constitue le premier stade d'altération des micas. La kaolinite, également retrouvée en abondance dans l'échantillon, peut avoir une origine secondaire dans le cadre d'une altération en milieu chaud et humide. Ces hypothèses seront à confirmer dans la suite des travaux.

Des phyllosilicates interstratifiés, qui peuvent constituer des minéraux plus réactifs, sont identifiés dans les briques et le ballast (Tableau 20). Rappelons que pour les premières, la montée en température des argiles, aux alentours de 1100° C, induit le phénomène de frittage par fusion de la périphérie de certains minéraux. La phase vitreuse produite soude les grains entre eux ce qui apporte la résistance mécanique souhaitée. Cela devrait fortement diminuer la réactivité des phases ce qui semble se confirmer d'après la valeur de bleu qui est du même ordre de grandeur que celle des bétons (Tableau 20). Pour le ballast, il est possible qu'il s'agisse d'argiles d'altérations (secondaires) et donc de minéraux effectivement réactifs. La valeur de bleu est de facto plus élevée (0.50 g de bleu/100 g). Ces hypothèses seront de nouveau discutées en phases 3 et 4 si ces matériaux sont retenus pour la confection des mélanges.

Tableau 19 : Phases minérales identifiées par DRX (hors argiles)

	Quartz	Plagioclase	Microcline	Amphibole	Argiles	Calcite	Dolomite	Whewellite	Vivianite	Koninckite	Gypse	Anhydrite	Ettringite	Goethite	Hématite	Amorphe
	SiO_2	$(Na_{0.5},Ca_{0.25})AlSi_3O_8$	$KAlSi_3O_8$	$(Ca,Na,K)_2(Mg,Fe^{2+},Fe^{3+},Al)_5[Si_6(Al,Si)_2O_{22}](OH,F)_2$		$CaCO_3$	$CaMg(CO_3)_2$	$Ca(C_2O_4)\cdot(H_2O)$	$(Fe_3(PO_4)_2.8(H_2O))$	$Fe^{3+}PO_4.3H_2O$	$CaSO_4\cdot 2H_2O$	$CaSO_4$	$Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}.26H_2O$	$\alpha\ Fe^{+3}O(OH)$	$\alpha\ Fe_2O_3$	
Compost	+	+	+		+	+		-		-						
Béton	++	-	+		+	-					-		-			
Boues de STEP	-	- (Anorthite)	-		+				+							+++
Déchets verts	++	- (Albite)	-		+++	-		-								
Boues de papeterie					++	+++	-									
Pneus	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Nettoyage des rues	+	- (Albite)	-	- (Actinolite)	++	+										
Terres excavées	++		+		++									+		
Déchets du bâtiment	+	+	+	- (Actinolite)	++	+					-					
Briques	++	- (Albite)	-		++	+						+			-	
Ballasts	+	+ (Albite)	+	- (Hornblende)	+	-										

-: problable en trace, +: faible, ++: présent, +++: abondant

Tableau 20 : Phases argileuses identifiées par DRX et valeurs au bleu de méthylène

	Argiles	dont Chlorite	dont Illite et/ou mica	dont Kaolinite	dont Talc	dont Interstratifiés	Valeur au bleu de méthylène (g de bleu /100g de matériau)
Compost	+	+++	++				1,28
Béton	+	++	+++	++			0,15
Boues de STEP	+		+++		+		0,21
Déchets verts	+++		++	+++			0,60
Boues de papeterie	++			+++	+		0,64
Nettoyage des rues	++	+++	++				< 0,07
Terres excavées	++	+	++	+++			0,37
Déchets du bâtiment	++	++	+++				0,11
Briques	++		++	+++		+++	0,18
Ballasts	+	+++	+			+++	0,50

+: faible, ++: présent, +++: abondant

Les résultats de valeur de bleu s'apprécient au regard des références du Guide des Terrassements Routiers (SETRA, 1992) qui compte 6 catégories de « sols » (Tableau 21).

Tableau 21 : Valeurs de bleu de référence et type de « sol » associé (SETRA, 1992)

Valeur de bleu de méthylène (VBS)	Catégorie de sol
VBS <0,1	sol insensible à l'eau
0,2 <= VBS <1,5	sol sablo limoneux, sensible à l'eau
1,5 <= VBS <2,5	sol sablo argileux, peu plastiques
2,5 <= VBS <6	sol limoneux de plasticité moyenne.
6 <= VBS <8	sol argileux.
VBS > 8	sol très argileux.

Les résultats obtenus montrent donc des VBS faibles ce qui est cohérent avec des teneurs faibles en argile (DRX) ou la présence d'argiles peut réactives. Ce paramètre a été mesuré pour explorer la surface spécifique des grains. Il est bien considéré un lien entre les deux mais il n'existe pas de relation numérique directe qui permettrait, à partir d'une mesure du premier, d'en déduire le second. Les essais seront éventuellement poursuivis au cours du projet pour établir cette relation si le paramètre « surface spécifique » s'impose pour comprendre les transformations des matériaux au cours de la pédogenèse.

Mesure de la Capacité de Neutralisation Acido-Basique (CNAB)

Les résultats de CNAB sont présentés 41 et Tableau 22.
En cohérence avec la littérature, les matières organiques ne montrent pas de pouvoir tampon vis-à-vis du pH : un apport d'acide ou de base se traduit quasi-instantanément par une modification du pH du lixiviat quelle que soit la valeur cible. Le ballast et la terre excavée montrent un comportement similaire.

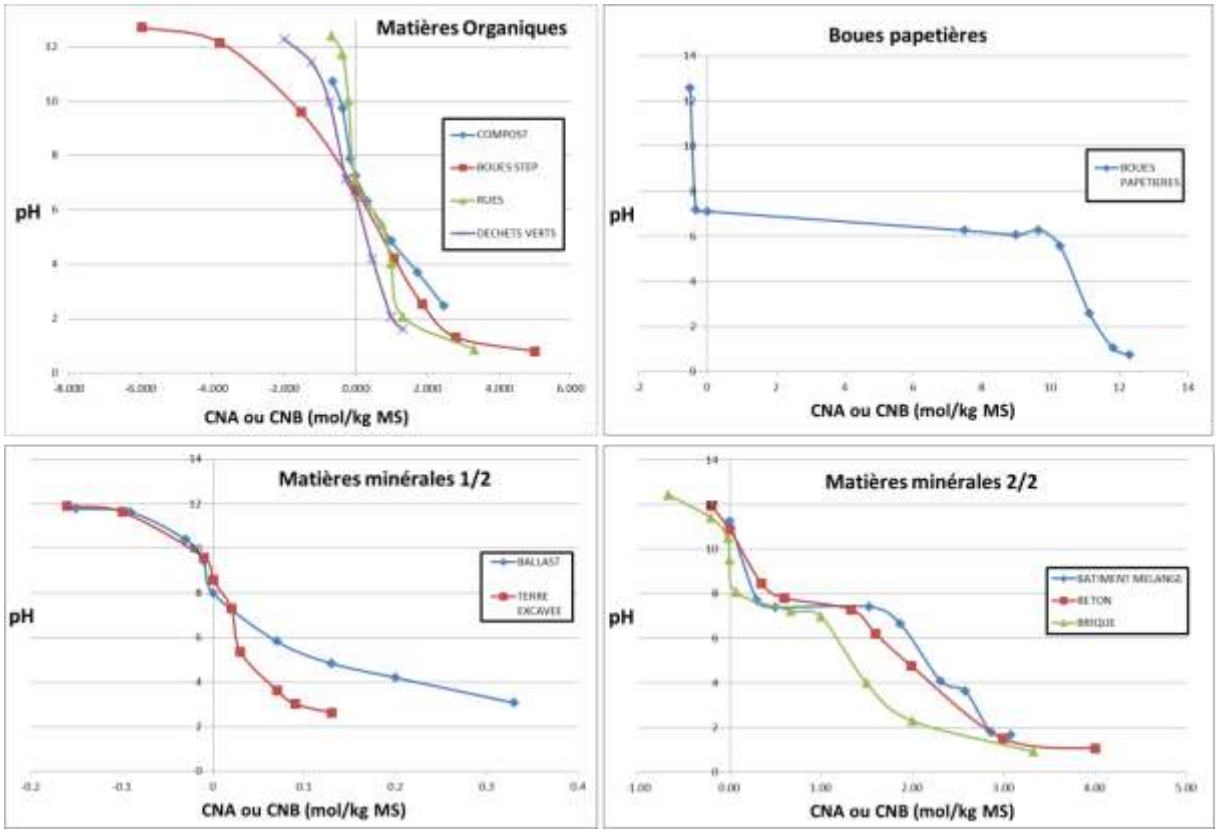


Figure 21 : Capacités de neutralisation acido-basique des matériaux

Tableau 22 : Capacité de neutralisation acide et basique des matériaux.

	Capacité de neutralisation basique (mol OH^-/kg MS)	Capacité de neutralisation acide (mol H^+/kg MS)	dont Capacité tampon à pH proche de 7 (mol H^+/kg MS)
Compost	0	2	0
Béton	0,8	4	1
Boues de STEP	6	5	0
Déchets verts	0,7	0,7	0
Boues de papèterie	0	12	10
Balayage de rue	0	3,5	0
Terre excavée	0,15	0,15	0
Mélange Bâtiment	0	3	1,8
Briques	0,7	3,2	1
Ballast	0,15	0,35	0

Les échantillons « béton », « briques », « mélange bâtiment » et surtout, « boues papetières », sont carbonatés ce qui explique le palier à pH proche de 7. Les boues papetières présentent un très fort pouvoir tampon dans cette gamme de pH (plus de 10 mol H^+/kg).
Ces données seront exploitées en vue de prédire le pH des mélanges.

III.3.d. Propriétés agronomiques

Description des matériaux

La couleur de chacun des matériaux a été définie sur échantillon sec et sur échantillon humide. Les résultats de ces observations à l'aide du guide sont résumés sur le Tableau 23.

Tableau 23 : Couleur des matériaux, d'après le code Munsell®

	Matériau sec		Matériau humide	
	coloris	**code**	**coloris**	**code**
Compost NFU 44 095	black	5 YR_ 2,5/1	inch.	inch.
Béton	light brownish gray	2,5Y_6/2	olive gray	5Y_4/2
	gray	(2,5Y_5/0 quelques particules)	inch.	inch.
Boues de STEP	white	5Y_8/1	inch.	inch.
	yellow	10 YR_7/8	inch.	inch.
	black	10 YR_2/1	inch.	inch.
	black	2,5 Y_2/0	inch.	inch.
Déchets verts	grayish brown	10 YR_5/2	inch.	inch.
	dark brown to brown	10YR_4/3	inch.	inch.
	olive yellow	2,5Y_6/6	inch.	inch.
Boues de papeterie	light bluish gray	(for gley) 5B_7/1	bluish gray	gley : 5B_6/1
	light gray	2,5Y_7/0	gray	2,5Y_5/0
Nettoyage de rue	dark grayish brown	10 YR_4/2	very dark grayish brown	10YR_3/2 (à 2/2)
Terres excavées	yellow	10 YR_7/8	olive yellow	2,5 Y_6/8
	gray	10YR_6/1	inch.	inch.
Déchets du bâtiment	brown	10YR_5/3	inch.	inch.
	weak red	(10R_5/3)	strong brown	7,5YR_4/6
Briques	light red	2,5 YR_6/6	red	2,5YR_5/8
Ballasts	veryt dark grayish brown	2,5Y_3/2	dark yellowish brown	10YR_3/6

Compost NFU 44-095

Le compost est un matériau de couleur marron à noire. Le produit est caractérisé par une faible diversité de ces constituants, représentés par des résidus végétaux ligneux et des agrégats de particules fines en proportion similaire. Le produit ne semble pas présenter de calcaire actif, compte tenu de sa non-réactivité à l'acide chlorhydrique.



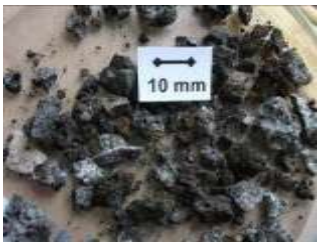


Bétons

Les bétons concassés sont de couleurs variant du jaune-brun au gris. Les particules sont de nature minérale. Les particules minérales identifiées sont très réactives à l'acide chlorhydrique et révèlent donc la présence de carbonates actifs.

Boues de STEP

Les boues de STEP déshydratées sont sous forme d'agrégats de taille et de couleur différente (agrégats « blancs », « gris », « bruns », « orangés ») et de particules fines issues de la fragmentation de ces agrégats. Le produit ne réagit pas sous l'action d'acide chlorhydrique, ce qui ne préjuge pas de la présence de carbonates réactifs.





Déchets verts

Les déchets verts non compostés sont constitués de résidus végétaux ligneux de type branche, de résidus foliaires et de résidus de résineux (thuyas et aiguilles) qui sont retrouvés dans les trois fractions granulométriques (> 5 mm, 2 – 5 mm et < 2 mm). On retrouve 3 couleurs prédominantes : un marron-gris, un marron très sombre tendant vers le noir, un jaune « olive ». Le produit ne produit pas d'effervescence lors de la mise en contact avec de l'acide chlorhydrique.

Sous-produits papetiers

Il s'agit d'un matériau composé d'agglomérats plus ou moins grossiers de couleur gris-bleutée à gris clair. On distingue des particules fibreuses associées entre elles par le biais d'un « ciment » gros pâteux. Le matériau réagit vivement à l'acide chlorhydrique ce qui préjuge de la présence de composants carbonatés réactifs.



Déchets provenant du nettoyage des rues

En dehors des éléments inertes (fragments de verre, graviers, sables) et indésirables (mégots de cigarettes), le produit est constitué de résidus végétaux de nature ligneuse (fragments de branches, résidus fibreux sous forme de pelote, et résidus épineux) et de résidus foliaires en proportion variables suivant leur granulométrie. On distingue deux couleurs principales : le marron foncé et l'ocre-brun des pelotes d'aiguilles de platane. Certains agrégats présentaient une faible réactivité à l'acide chlorhydrique.





Terres excavées

Le matériau est constitué essentiellement de particules minérales de deux couleurs : jaune-ocre et gris. Les particules sont majoritairement fines à très fines. Aucune réactivité n'est notée lors de l'application d'acide chlorhydrique.

Mélange de déchets du bâtiment

Il s'agit d'un matériau très hétérogène en composition : résidus de carrelage, de briques, de plâtre, de verre, de marbre, de béton ; également en couleur, on observe essentiellement du marron clair et du gris. La réactivité à l'acide varie en fonction des matériaux. Les matériaux type « béton » sont réactifs alors que ceux de type briques ne réagissent pas.







Briques

Le matériau est homogène en composition –débris de fabrication de briques- et donc en couleur orange-rouge. La taille des particules varie avec le concassage réalisé. Aucune réactivité à l'acide n'est observée.

Ballast

Le produit présente deux types de particules : des particules fines (peu représentatives) qui semblent être des poussières résiduelles de terre, végétaux, particules atmosphériques de couleur marron très foncé ; des particules grossières à très grossières, roches dures cristallisées, de couleur noire. Aucune réactivité n'est observée lors du test à l'acide.



Boues de STEP (Figure 22)

Les résultats de l'étude morpho-analytique par MET-EDX montrent que la composition des boues de STEP déshydratées est hétérogène selon les agrégats :

- les agrégats « blancs » et « gris », majoritaire dans le produit, sont constitués d'une matrice compacte composée majoritairement de bactéries vivantes. Ces bactéries sont physiologiquement viables et peuvent jouer un rôle actif dans la biodégradation des matières organiques. Ces bactéries sont source d'éléments fertilisants biodisponibles rapidement.

- Les agrégats « bruns » et « orangés » sont constitués d'une matrice compacte composée majoritairement de résidus de bactéries et de matières organiques transformées associés à des éléments fertilisants biodisponibles à plus long terme.

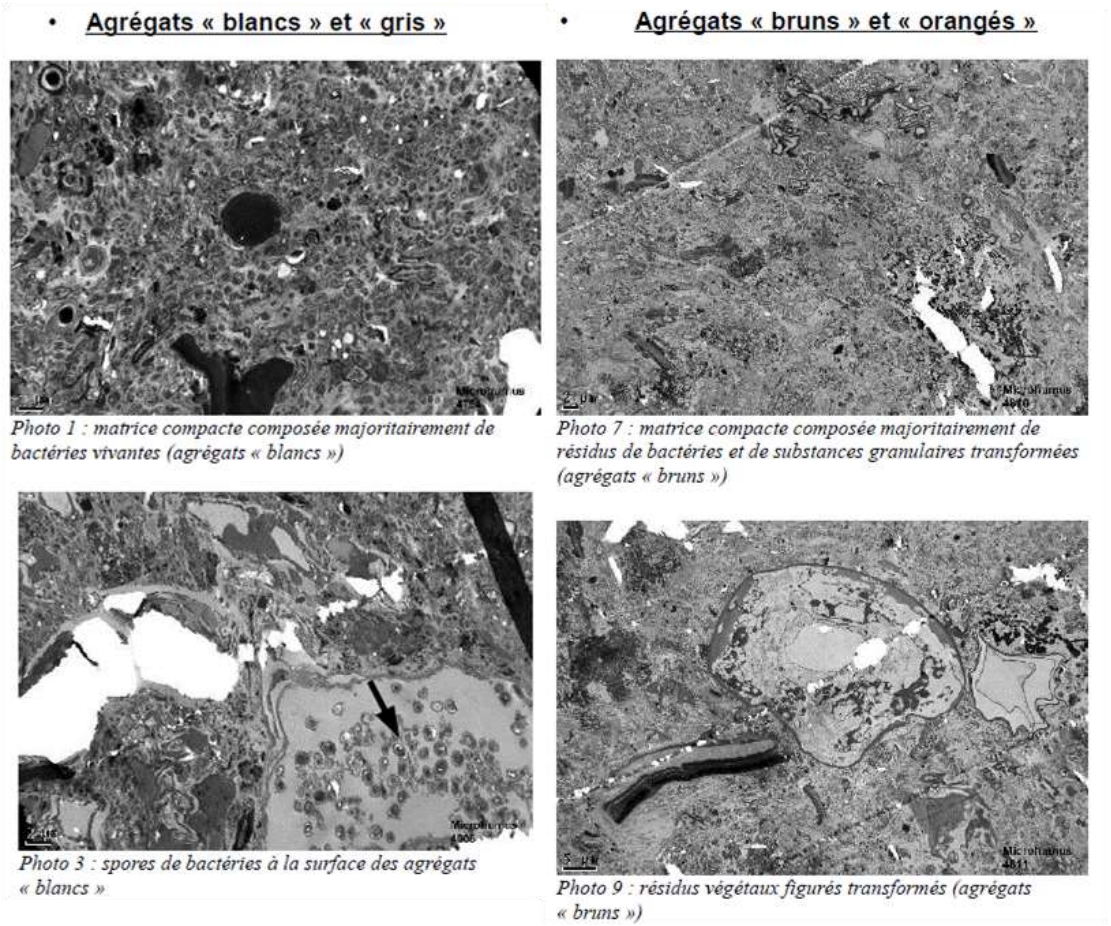


Figure 22 : Clichés MET des boues de STEP

Sous-produits papetiers (Figure 23)

Les boues papetières comportent :

- Une matrice minérale prépondérante : l'analyse MET-EDX montre que cette matrice est constituée de silice et d'aluminium (argiles) ainsi que de calcium.

- Des fibres végétales en cours de transformation : ces fibres sont fortement associées au calcium, ce qui peut interférer sur leur biodégradabilité.

- Un potentiel bactérien particulièrement important pour des boues de papeterie : on observe une diversité des bactéries vivantes importante. Les résidus bactériens sont associés à l'azote et au phosphore et sont persistants dans le produit.

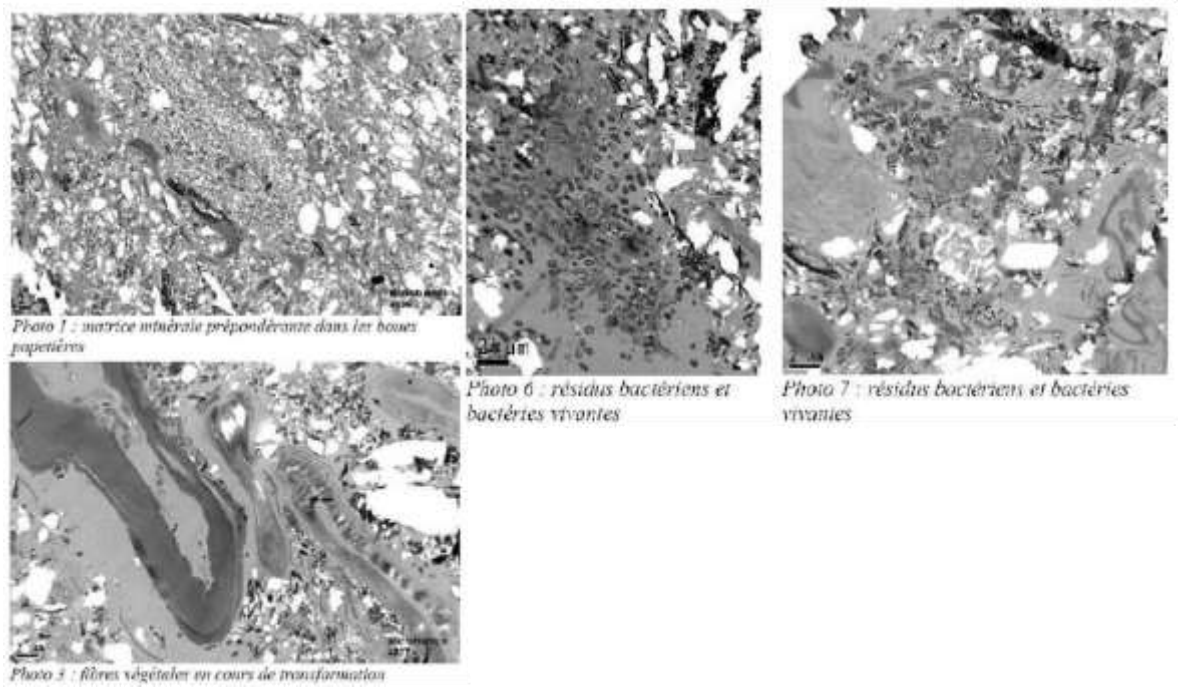


Figure 23 : Clichés MET des sous-produits papetiers

Déchets verts (Figure 24)

Les différents constituants identifiés précédemment ont été caractérisés par MET/EDX :

- Caractérisation des résidus ligneux : les résidus ligneux sont composés de matières organiques en cours de transformation. La présence de spores de bactéries et de nombreux champignons vivants témoigne d'un potentiel microbien important au niveau de ces résidus. Même non compostés, les résidus ligneux subissent une biodégradation et leur niveau de transformation est évolutif.

- Caractérisation des résidus foliaires : Les résidus foliaires sont composés de matières organiques ayant un niveau de transformation qui diffère selon leur nature. D'une part, les résidus tissulaires parenchymateux sont fortement colonisés par des bactéries et des champignons actifs. D'autre part, les contenus cellulaires riches en substances polyphénoliques et en résidus de plastes récalcitrants par nature à la biodégradation sont peu transformés et ne sont pratiquement pas colonisés par les microorganismes.

- Caractérisation des résidus de résineux : Les feuilles de thuyas et les aiguilles de résineux sont composées de matières organiques par nature récalcitrantes à la décomposition (substances polyphénoliques) et sont sources de matières organiques « stables » pour les sols. Des bactéries vivantes et des champignons sont observés au niveau de ces résidus.

Malgré l'absence de compostage et le faible taux d'humidité, les déchets verts sont en cours de transformation. De nombreuses bactéries et champignons vivants et actifs ont colonisés les résidus ligneux et les résidus foliaires, et sont à l'origine du caractère évolutif du produit. Le produit est également caractérisé par des matières organiques par nature récalcitrantes à la biodégradation, qui sont peu colonisées par les microorganismes, et qui peuvent constituer un pool de matières organiques stables pour les sols.

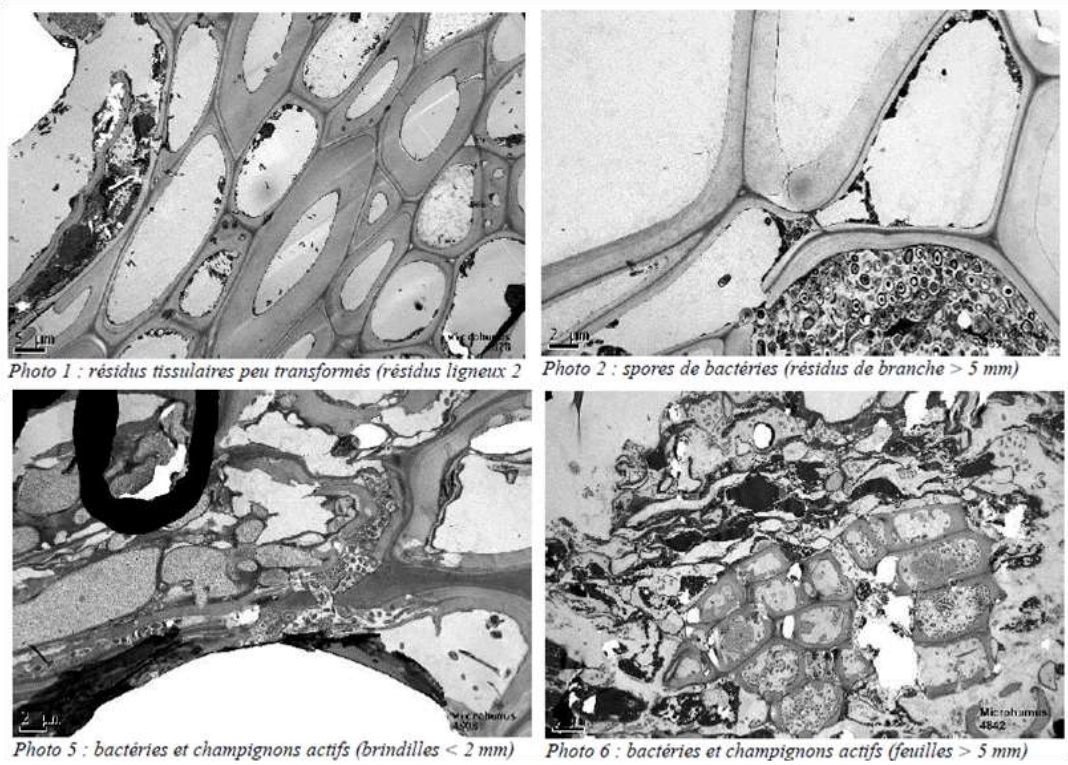


Figure 24 : Clichés MET des déchets verts

Compost boue - déchets verts (Figure 25)

- Caractérisation des résidus végétaux ligneux : Les résidus végétaux ligneux constituent la totalité de la fraction > 5 mm (29% pondéral). Dans cette fraction, ils sont présents sous forme de résidus tissulaires peu transformés, et sont colonisés par des spores de bactéries. Leurs parois cellulaires présentent un début d'humification d'origine chimique et biologique. Dans les fractions plus fines, les résidus végétaux ligneux présentent une transformation plus avancée. Ils sont colonisés par des spores de bactéries et des spores de champignons qui témoignent du bon processus de compostage du produit. Les résidus végétaux ligneux restent en grande partie à biodégrader. Ils sont colonisés par des spores de bactéries et des spores de champignons qui témoignent du bon compostage du produit.

- Caractérisation des agrégats de particules fines : Les agrégats de particules fines sont composés de matières organiques transformées dont des résidus tissulaires et cellulaires d'origine foliaire (nombreux résidus de plastes), associées à une fraction minérale importante. Les agrégats organo-minéraux ont un aspect tassé et compacte : la macrofaune a pu jouer un rôle important dans le brassage et la restructuration des matières organiques et minérales. Les agrégats organo-minéraux sont associés à des spores de bactéries qui témoignent du bon compostage du produit (potentiel bactérien latent). Les agrégats organo-minéraux sont relativement stables. Ils résultent de l'association des matières organiques végétales transformées principalement d'origine foliaire avec une fraction minérale. Leur aspect tassé et compacte suggère que la macrofaune a pu jouer un rôle important dans le brassage et la restructuration fines des matières organiques et minérales. La présence de spores de bactéries témoigne du bon processus de compostage du produit.

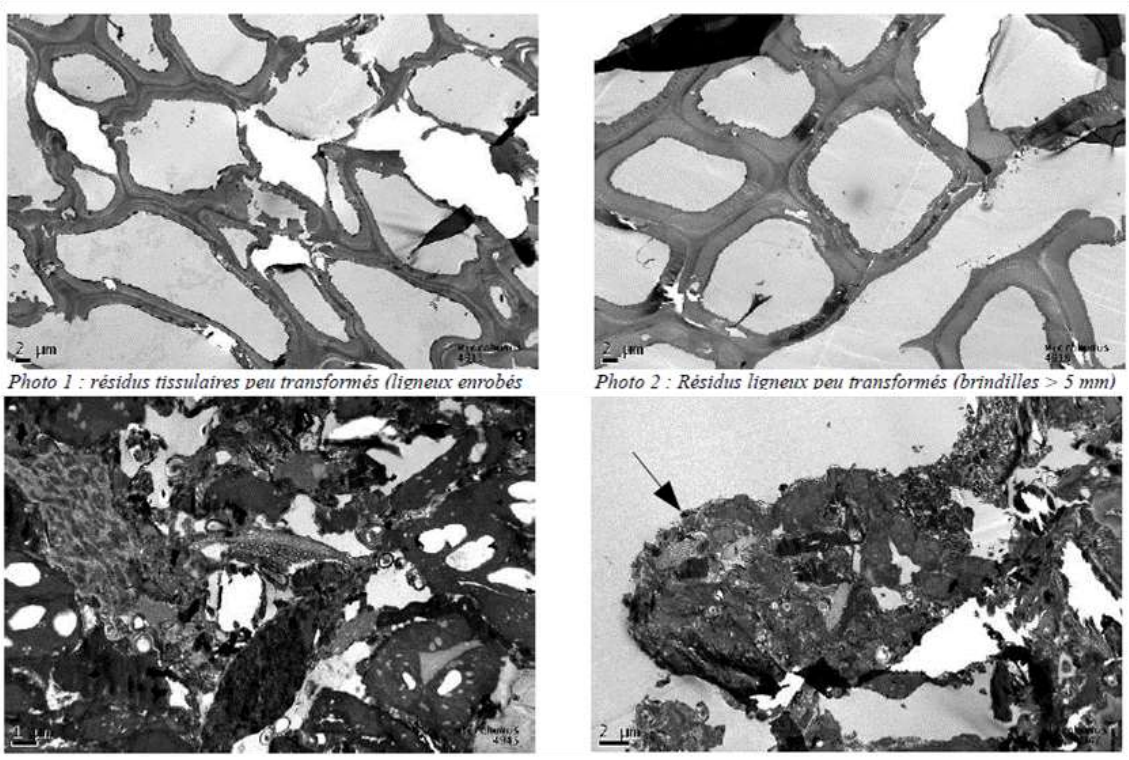


Figure 25 : Clichés MET du compost

Déchets de nettoyage des rues (Figure 26)

- Les résidus végétaux ligneux sont en cours de transformation et sont caractérisés par un potentiel bactérien et fongique actif. Les résidus foliaires sont très transformés et sont associés aux minéraux (argiles et quartz) dans les fractions fines.

- Dans notre cas, la majorité du produit est représentée par des résidus épineux et des fibres végétales sous forme de pelotes probablement issus d'une espèce d'arbre spécifique qui peut ne pas être présente sur un autre site. Les déchets issus du nettoyage des rues auront une composition très hétérogène dans le temps suivant le site et la saison.

- Des résidus de bactéries ayant une morphologie proche de celles des entérocoques ont été observés à proximité des fibres végétales sous forme de pelote probablement issues d'une espèce d'arbre présente sur le site. Il est important de s'assurer de l'absence de microorganismes pathogènes dans ce type de produit.

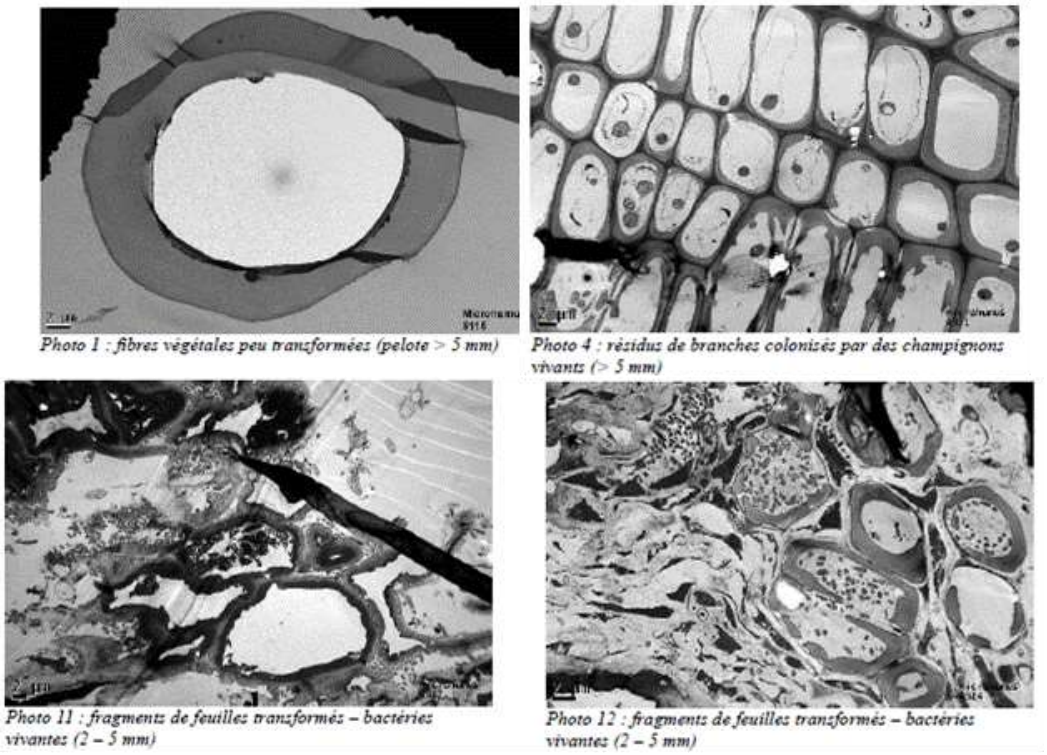


Figure 26 : Clichés MET des déchets de nettoyage des rues

Fertilité physique

Densité apparente

Le protocole suivi étant normalement utilisé pour des amendements ou support de végétation, les résultats sont donnés ici à titre indicatif.

Les résultats (Tableau 24) montrent que les matériaux présentent des densités apparentes très contrastées qui sont néanmoins fortement corrélées aux teneurs en matières minérales.

Une incohérence semble apparaitre concernant les densités apparentes respectives des composts et sous-produits papetiers. Un protocole est en cours d'élaboration afin d'avoir un même traitement pour tous les échantillons.

Densité réelle

L'hétérogénéité des valeurs de densité réelle mesurées mettent indirectement évidence la variabilité de composition des matériaux.

Tableau 24 : Densités apparentes et densités réelles des matériaux étudiés

Matériau	Densité apparente (Da)	*ET*	Densité réelle (Dr)	*ET*
Compost	0,07	*0,00*	2,03	*0,04*
Béton	0,49	*0,01*	2,5	*0,06*
Boues de STEP	0,04	*0,00*	1,41	*0,01*
Déchets verts	0,58	*0,02*	1,95	*0,07*
Sous-produits papetiers	0,22	*0,00*	2,16	*0,04*
Déchets de nettoyage des rues	0,01	*0,00*	2,19	*0,04*
Terres excavées basiques	0,85	*0,01*	2,59	*0,06*
Déchets du bâtiment	n.d.	*n.d.*	2,51	*0,08*
Briques	1,01	*0,04*	2,65	*0,02*
Ballasts	1,3	*0,01*	2,9	*0,06*

La mesure **des teneurs en eau** à deux pressions différentes **(pF2,5 et pF 4,2)** a été effectuée (Tableau 25). La différence des quantités d'eau retenue par les matériaux est la quantité réellement utilisable par la plupart des plantes : c'est la réserve en eau utile. Les résultats des mesures de teneurs en eau caractéristiques permettent de distinguer deux catégories de potentiel de rétention en eau : ceux qui ont une réserve en eau utile faible, comme les bétons, et les ballasts et ceux qui ont une réserve en eau utile satisfaisante - compost, sous-produits papetiers, déchets du bâtiment, briques, terres excavées acides - à élevée tels que les boues de STEP, les déchets de rue et la terre excavée basique (Figure 27).

Tableau 25 : Humidités caractéristiques et calcul de la réserve en eau utile des matériaux étudiés

Matériau	pF 2,5	*ET*	pF 4,2	*ET*	Eau utile
	% massique				
Compost	50	*1,8*	32,7	*1,8*	17,3
Béton	13,6	*0,5*	7,8	*0,1*	5,8
Boues de STEP	169	*5,7*	148	*6*	21
Déchets verts	74,9	*3,7*	55,6	*1,1*	19,3
Sous-produits papetiers	43	*0,9*	28,3	*2*	14,7
Déchets de nettoyage des rues	72,3	*1,1*	47,9	*7,2*	24,4
Terres excavées	26	*0,2*	4,8	*0,1*	21,2
Déchets du bâtiment	19	*0,4*	6,4	*0,2*	12,6
Briques	21,4	*0,1*	3,3	*0,1*	18,1
Ballasts broyés	8,5	*0,2*	0,7	*0,1*	7,7

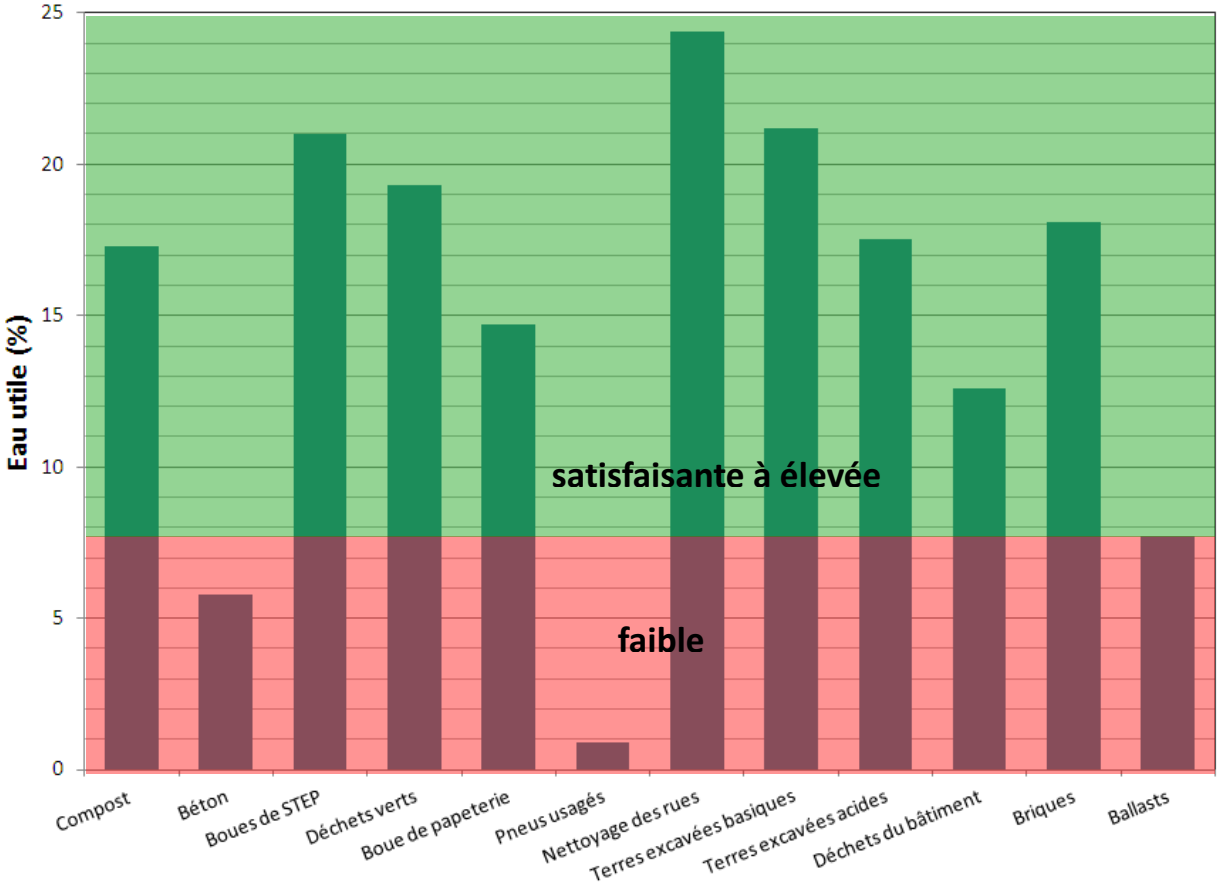


Figure 27 : Evaluation qualitative des réserves en eau utile des matériaux étudiés

Conductivité hydraulique à saturation (notée Ks)

Les valeurs de Ks obtenues sont présentées dans le Tableau 26.

Tableau 26 : Conductivités hydrauliques à saturation (Ks)

Matériau	Ks ($cm.s^{-1}$)
Compost	$8,95\ E^{-03}$
Béton	$1,43E^{-03}$
Boues de STEP	$7,02E^{-05}$
Déchets verts	$4,04E^{-03}$
Sous-Produits Papetiers	$9,65E^{-03}$
Déchets de nettoyage des rues	$1,14E^{-02}$
Terres excavées	$2,69E^{-04}$
Briques	$2,53E^{-04}$

Les ballasts et déchets du bâtiment n'ont pas été traités en raison de la taille des particules qui n'a pas permis une humectation homogène de l'échantillon et la possibilité d'avoir une surface plane permettant la mesure à l'aide de l'infiltromètre.

Granulométrie :
La première observation concernant la répartition des particules de taille inférieure à 2 mm est le pourcentage de sables supérieur à 60% dans tous les matériaux, exceptés pour le compost et la terre d'excavation (Figure 28 et Tableau 27).

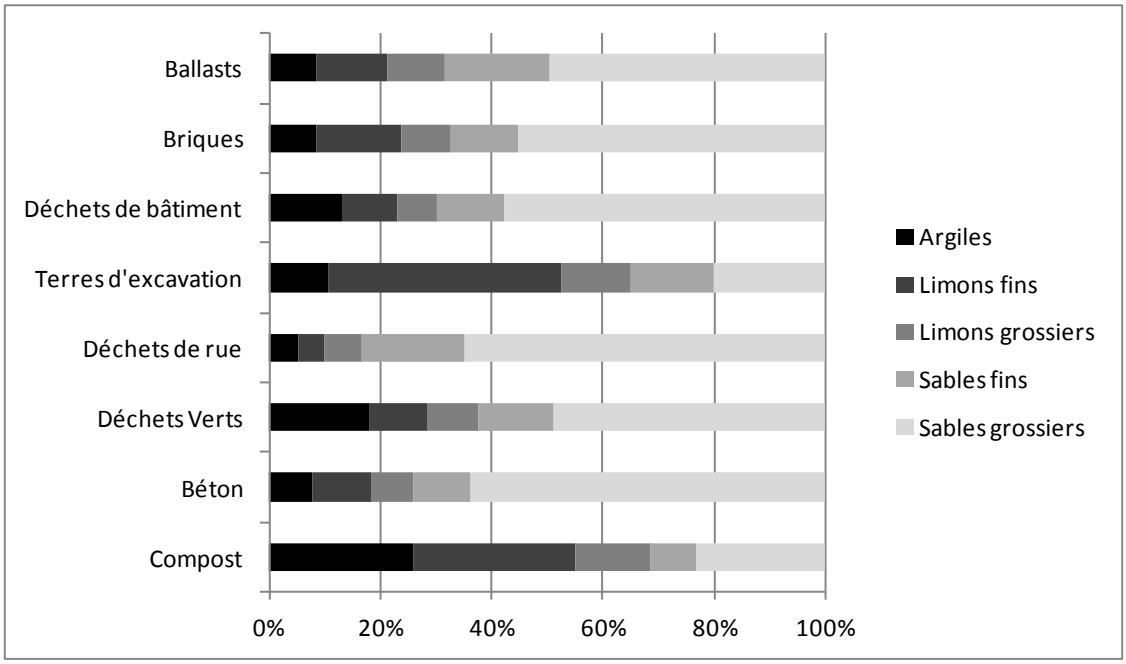


Figure 28 : Répartition granulométrique des matériaux

Tableau 27 : Répartition granulométrique des matériaux après destruction des matières organiques et sans décarbonatation tamisés à 2 mm

Matériau	Fraction massique (%)				
	Argiles	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers
Compost	26	29	13	8	23
Béton	8	11	7	11	64
Déchets Verts	18	10	9	14	49
Déchets de rue	5	5	7	19	65
Terres excavées	11	42	13	15	20
Déchets du bâtiment	13	10	7	12	58
Briques	8	15	9	12	55
Ballasts	8	13	10	19	50

Les matériaux ont essentiellement des textures grossières, à l'exception du compost (26% d'argiles), des déchets verts (28% de particules inférieures à 20 µm) et dans une moindre mesure des terres d'excavation (42 % de limons fins).

Compost NFU 44-095
Il s'agit d'un matériau constitué de 41,4% de matière organique dont la densité apparente mesurée (0,07) semble faible par rapport aux valeurs retrouvées dans la littérature (Da = 0,29, Grosbellet, 2009). D'où la nécessité de mettre en place un dispositif adapté à la variété des matériaux. La densité réelle de 2.03 obtenue est cohérente avec les valeurs retrouvées dans la littérature (Séré, 2007 ; Grosbellet, 2009).
Avec sa richesse en matière organique en masse sèche et une réserve en eau utile de 14.3 % en masse, cela fait du compost un matériau ayant un bon potentiel pour la structuration du sol ainsi que pour

l'approvisionnement en eau. Le compost est de texture majoritairement limoneuse (43%) avec 26% d'argiles et 31% de sables.

Bétons
Le béton est de nature minérale (97,4%), il présente une densité réelle de 2,5. Il présente une réserve en eau utile très insuffisante à l'approvisionnement en eau. En terme de distribution granulométrique, le béton présente, en termes agronomiques, une texture sableuse (75%) avec seulement 18% de limons et 8% d'argiles.

Boues de STEP
Les boues de STEP présentent la plus forte teneur en matière organique (69,5%) et sont constituées d'agrégats de différentes tailles. Ce produit étant une boue déshydratée, l'analyse granulométrique typiquement appliquée en agronomie n'a pu être réalisée. Elles présentent une densité réelle de 1,41 ce qui traduit la nature organique, à dominante bactérienne des constituants, par comparaison avec le compost ou les déchets verts par exemple. Si le produit est très hydrophobe (grandes difficultés d'humectation), il présente cependant une réserve en eau utile élevée (17,9 % en masse).

Déchets verts
Les déchets verts à 55,3 % de matière organique sont constitués essentiellement de résidus végétaux. Leur densité réelle est de 1,95, valeur proche de celle du compost. Ils présentent une réserve en eau utile faible. Cela doit être dû à la composition même du produit et du caractère hydrophobe de la plupart des résidus végétaux. Les déchets verts présentent une texture sableuse (63%) avec 18 % d'argiles et 19% de limons.

Sous-produits papetiers
Le produit est de nature essentiellement minérale avec 28,1 % de matière organique. Sa densité réelle est de 2,16 (valeur très proche de celle trouvée par Séré, 2007). Ce matériau présente une bonne réserve en eau utile avec 14,1 %. Le produit se présentant sous forme pâteuse, comme les Boues de STEP, l'étude granulométrique n'a pu être réalisée.

Déchets provenant du nettoyage des rues
Il s'agit d'un matériau assez mixte en apparence car il est composé en proportion assez équivalente en particules organiques et minérales. Les particules d'origine organique du matériau sont des éléments végétaux ligneux et épineux avec notamment des akènes provenant de platanes. Ces éléments sont volumineux mais très légers. En proportion massique, la fraction organique ne correspond pourtant qu'à 28,3 %. La densité réelle de ce produit est de 2,19, soit une densité proche de celle d'un compost. Une des caractéristiques remarquable de ce matériau est sa très haute réserve en eau utile, la plus élevée de la série des matériaux modèles. Les déchets de rue sont de texture sableuse avec seulement 5 % d'argiles et 26% de limons.

Terres excavées
La terre d'excavation est de nature minérale, avec seulement 2,2 % de matière organique. Sa densité réelle de 2,59 est caractéristique de l'horizon profond d'un sol naturel. Ce produit présente une bonne réserve en eau utile et permettra un bon approvisionnement à l'eau pour les plantes. Cette terre d'excavation a une texture limoneuse (55%) avec 11% d'argiles et 35% de sables.

Mélange de déchets du bâtiment
Les 1,9% massiques de matière organique retrouvé pour ce matériau peuvent s'expliquer par les résidus terreux retrouvés après récupération de ce type de déchets sur site. La densité réelle du produit de 2,51 est proche de celle d'un sol. La réserve en eau utile pour la plante est faible. Ceci s'explique notamment par la composition très hétérogène du matériau et la présence de verre et de résidus de carrelage qui ne peuvent retenir l'eau. La texture de ca matériau est sableuse et le reste des particules, comme pour les bétons se répartissent entre les limons (17%) et les argiles (13%).

Déchets de la fabrication des briques
Le produit est exclusivement constitué de particules minérales (99,7%) et présente une densité réelle élevée, de même ordre de grandeur que celle des déchets du bâtiment (2,65). Sa réserve en eau utile est néanmoins plus élevée ce qui s'explique probablement par la nature et le mode de fabrication du matériau (argile cuit). Comme les déchets du bâtiment, les briques sont de texture sableuse (67%) avec 24% de limons et 8% d'argiles.

Ballast
Tout comme les briques, ce produit est entièrement minéral. La fraction très faible 0,4% de matières organiques pourrait correspondre à des résidus terreux ou végétaux lors de la récupération du matériau sur les chemins de fer. Le ballast est le matériau qui présente la densité réelle la plus élevée avec une valeur de 2,9. Il découle de ces éléments, de son caractère massif et de son absence de structure pédologique une faible réserve en eau utile (4,18%), constituée uniquement par la fine couche de poussière qui recouvre les roches. En termes de granulométrie, la fraction inférieure à 2 mm du ballast est constituée de 69% de sable (à mettre en lien avec la fraction étudiée qui est issue d'un tamisage et non d'un broyage), 23% de limons et 8% d'argiles.

Fertilité chimique

Fractions organique/minérale

Les mesures de la fraction organique et de la fraction minérale (Tableau 28) permettent un premier classement des matériaux :

- Les matériaux minéraux : Béton, Terres excavées, Déchets de bâtiment, Briques, Ballasts.
- Les matériaux à fort taux de matière organique : Compost, Boues de STEP, Déchets verts.
- Les matériaux intermédiaires (environ 25% de MO) : Sous-produits papetiers, Déchets de rue.

Tableau 28 : Fractions organiques et minérales des matériaux étudiés

Matériau	Fraction organique (%)	Fraction minérale (%)	*Ecart type*
Compost	41,4	58,6	*2,4*
Béton	2,6	97,4	*0*
Boues de STEP	69,5	30,5	*1,5*
Déchets verts	55,3	44,7	*2,8*
Sous produits papetiers	28,1	71,9	*0,4*
Déchets de rue	28,3	71,7	*1,2*
Terres excavées	2,2	97,8	*0,2*
Déchets du bâtiment	1,9	98,2	*0,8*
Briques	0,3	99,7	*0,1*
Ballasts	0,4	99,6	*0,1*

Teneures en Si, Al et Fe extractibles
La mesure d'oligoéléments extractibles est usuellement appliquée à l'étude de la pédogenèse des sols, en particulier pour déterminer leur niveau d'altération. Dans le cadre du projet SITERRE, il s'agit ici i) de mesurer ces paramètres afin de comparer les valeurs obtenues avec une gamme de sols naturels ; ii) de contribuer à un état initial afin d'envisager un suivi au cours du temps lors de la tâche 4.

Tableau 29 : Concentrations en Si Al Fe extractibles dans les matériaux étudiés et gammes usuelles dans les sols naturels (Jeanroy, 1983)

Matériau	Si	Al	Fe
	g.kg $^{-1}$		
Compost	0,9	1,9	13,3
Béton	4,0	2,2	9,1
Boues de STEP	1,3	4,2	62,2
Déchets Verts	2,0	0,6	4,8
Sous-produits papetiers	1,1	0,8	0,5
Déchets de rue	1,2	0,7	6,4
Terres excavées	1,2	1,6	22,4
Déchets du bâtiment	2,9	1,5	8,2
Briques	1,6	1,5	16,9
Ballasts	1,4	0,9	27,3
Gamme sols naturels	*0,1 – 1,5*	*0,2 - 10*	*1 - 15*

Les résultats obtenus (Tableau 29) témoignent globalement des concentrations élevées en éléments extractibles dans ces matériaux d'origine technogénique. Ils sont cohérents avec leur faible niveau d'altération résultant du fait qu'ils n'ont pas été soumis à l'influence des facteurs de la pédogenèse entraînant la lixiviation de ces éléments. Il est cependant possible de relier les fortes concentrations extractibles en Si mesurés dans le béton, les déchets du bâtiment et dans les briques à la part importante des éléments siliceux rentrant dans leur composition. Dans le cas des déchets verts, l'hypothèse la plus vraisemblable est la forte contribution de certaines cellules végétales, appelées phytolithes, très riches en Si (Séré, 2007). En ce qui concerne l'Al, les concentrations mesurées se situent dans la médiane des sols naturels. La plus forte concentration mesurée dans les boues de STEP s'explique par l'utilisation de sulfate d'alumine dans le processus de floculation coagulation. Les concentrations en Fe extractible sont particulièrement élevées dans plusieurs matériaux. Dans le cas des boues de STEP, l'origine est probablement le chlorure ferrique, également utilisé dans le processus et largement extrait par le protocole de mesure appliqué. La proximité des ballasts avec les rails en acier explique probablement les fortes teneurs en Fe, dont une partie significative (25%) a déjà subi une altération le rendant extractible. La terre d'excavation basique présente une anomalie naturelle forte en Fe, d'autant plus intéressante que près de 70% de ce Fe est extractible.

Tableau 30 : Valeurs de pH, concentrations en calcaire total, calcaire actif, carbone total et carbone organique

Matériau	pH	$CaCO_3$ total	$CaCO_3$ actif	C_{total}	C_{org}
		g.kg^{-1}			
Compost	7,9	11,1	n.d.	191,3	190,0
Béton	9,8	112,0	52,6	26,7	*13,3*
Boues de STEP	7,4	7,5	n.d.	334,9	334,0
Déchets verts	7,7	13,5	n.d.	237,6	236,0
Sous-produits papetiers	8,3	601,0	335,5	220,1	148,0
Déchets de rue	7,9	54,2	n.d.	140,5	134,0
Terres excavées	8,7	1,4	n.d.	1,3	*1,1*
Déchets du bâtiment	10,8	114,0	63,8	20,3	*6,6*
Briques	9,3	207,0	24,8	12,1	*0,0*
Ballasts	7,8	2,2	n.d.	18,5	*18,2*

En termes agronomique le pH optimum en lien avec l'assimilation des nutriments par la plante est fixé entre 6.5 et 7.5 pour les sols non calcaires (Tableau 30).

Tableau 31 : Concentration en azote total, phosphore disponible et capacité d'échange cationique

Matériau	N_{total}	P_{Olsen}	CEC Metson
	$g.kg^{-1}$	$g.kg^{-1}$	$cmol^{+}.kg^{-1}$
Compost	21,4	0,935	31,4
Béton	0,47	0,061	8,21
Boues de STEP	60,3	3,85	74
Déchets verts	13,8	1,09	23,8
Sous-produits papetiers	2,5	0,094	2,61
Déchets de rue	4,7	0,179	6,73
Terres excavées	0,46	0,05	1,49
Déchets du bâtiment	0,53	0,089	3,96
Briques	0,07	0,026	1,58
Ballasts	0,55	0,041	5,8

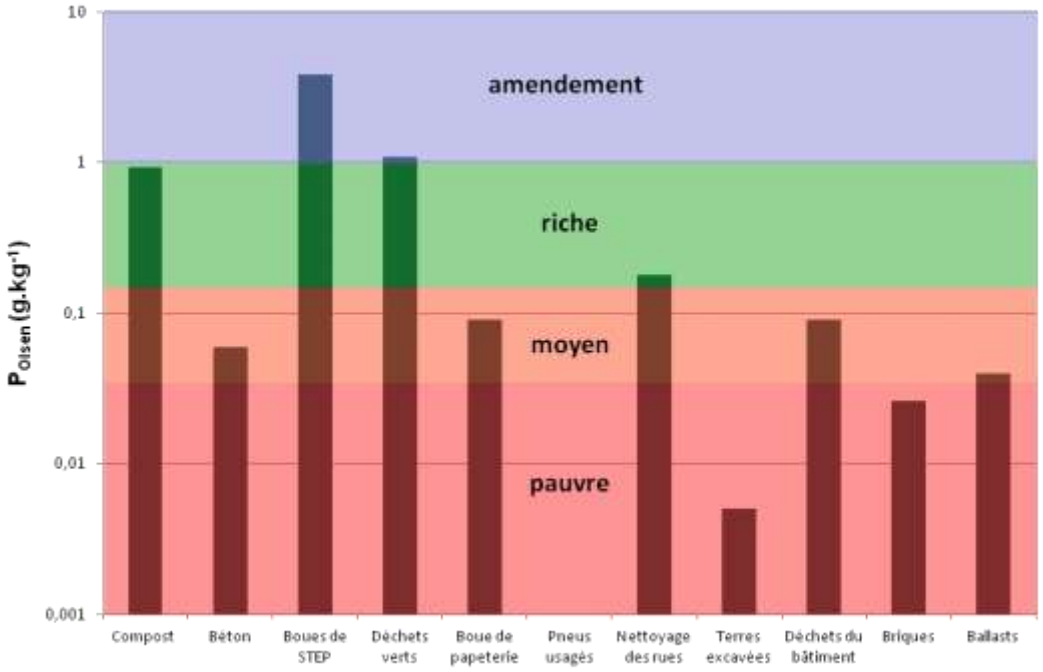


Figure 29 : Interprétation des niveaux de phosphore disponible dans les matériaux étudiés

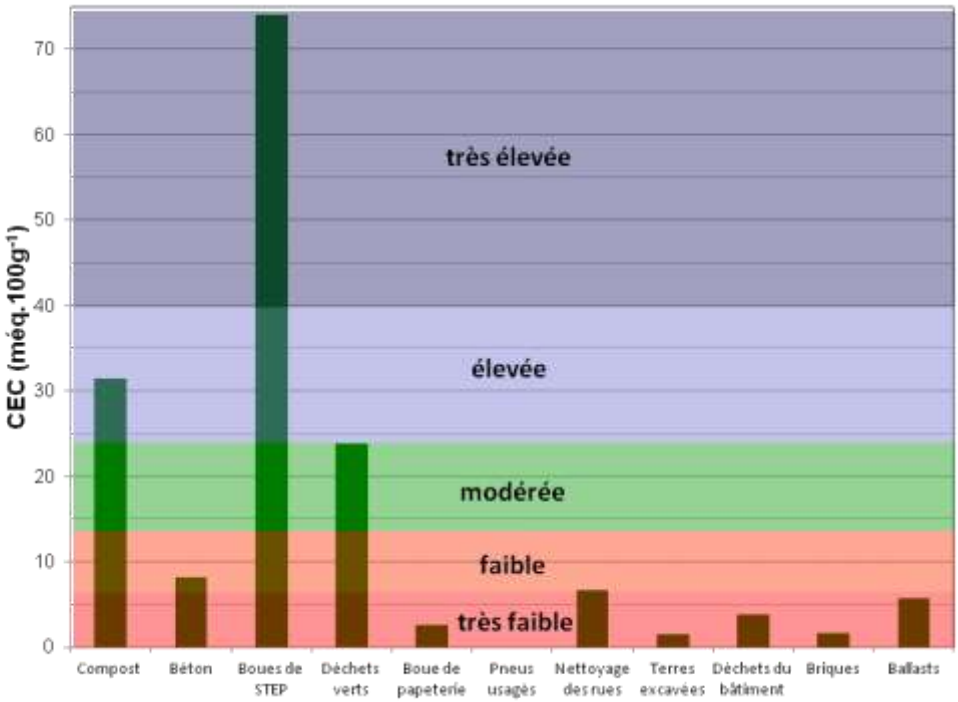


Figure 30 : Interprétation des niveaux de CEC dans les matériaux étudiés

Une description par matériau est présentée ci-dessous, en se référant aux Tableau 30 et Tableau 31, et aux Figure 29 et Figure 30.

Compost NFU 44-095
Il présente un pH à l'eau légèrement basique (7,9) qui s'explique par la présence de calcaire dans le matériau, mais sous une forme non réactive (pas de calcaire actif). Pour ce matériau qui est bien pourvu en matières organiques (41,4%) la nature du carbone (C) est à 99% d'origine organique. L'azote est présent en quantité (21,4 $g.kg^{-1}$). La concentration en P extractible (Olsen) est élevée comparée aux valeurs que l'on peut retrouver dans des sols. La Capacité d'Echange Cationique (CEC) est très élevée dans le compost mais nous ne pouvons calculer le taux de saturation sans avoir la somme des bases échangeables.

Bétons
Il présente un pH à l'eau très basique (9,8) et présente un taux élevé de carbonates dont 47% sont des carbonates actifs. Ce matériau est pauvre en matières organiques (2,9%) mais présente un taux de carbone organique de 1,33%. La proportion d'azote est de 0,047% et celle de P assimilable est moyenne avec 0,061 $g.kg^{-1}$. Sa CEC est faible avec 8,21 $cmol^{+}.kg^{-1}$.

Boues de STEP
Elles présentent un pH proche de la neutralité avec une valeur de 7,4 et leur taux de carbonates est faible. Ce matériau de nature très organique (69,5% en masse) présente une forte proportion en carbone, qui est exclusivement sous forme organique (99,7%). C'est le matériau le plus riche en azote avec 60,3 $g.kg^{-1}$ et également le plus riche en P assimilable 3,85 $g.kg^{-}1$, et présentant la CEC la plus élevée avec 74 $cmol^{+}.kg^{-}1$ ce qui fait de lui un élément à fort potentiel fertilisant.

Déchets verts
Leur pH est légèrement basique avec une valeur de 7,7 et leur taux de carbonates, comme pour l compost reste faible 13,5 $g.kg^{-1}$. Ce matériau, également de nature essentiellement organique (55,3%) présente une forte proportion de carbone, qui est exclusivement sous forme organique (99,3%), sans doute en raison des résidus végétaux. Il fait partie du groupe de matériaux qui présentent les plus fortes teneurs en N avec ici 13,8 $g.kg^{-1}$ et 1,09 $g.kg^{-1}$ de P assimilable soit un taux plus faible que les boues de STEP mais plus élevée que celui du compost. Sa CEC est élevée avec 23,8 $cmol^{+}.kg^{-1}$.

Sous-produits de l'industrie papetière (SPP)
Il présente un pH à l'eau basique (8,3) et présente le taux le plus élevé de carbonates dont 56% sont des carbonates actifs. Ce matériau est assez riche en matières organiques (28,1%) qui sont essentiellement carbonées avec 67% du carbone qui est sous forme organique. La teneur en N (2,5 $g.kg^{-1}$) dans ce matériau est plus faible que dans les autres matériaux à teneur élevée en matière organique. Ce produit est

également plus pauvre en P assimilable que les autres matériaux organiques avec seulement 0,094 g.kg^{-1}. Sa CEC est très faible avec seulement 2,61 cmol^{+}.kg^{-1}.

Déchets provenant du nettoyage des rues
Il présente un pH à l'eau basique (7,9) et présente un taux de carbonates de 54,2 g.kg^{-1} qui ne sont pas réactifs dont 56% sont des carbonates peu réactifs. Ce matériau est assez riche en matières organiques (28,3%) comme pour les SPP qui sont surtout carbonées avec 95% du carbone qui est sous forme organique. La teneur en N (4,7 g.kg^{-1}) dans ce matériau n'est pas très élevée. Ce produit est également plus pauvre en P assimilable que les autres matériaux organiques mais quand même légèrement plus riche que les SPP avec 0,179 g.kg^{-1} de P disponible pour la plante. Sa CEC est légèrement plus élevée que celle des SPP avec 6,73 cmol^{+}.kg^{-1}.

Terres excavées
Il présente un pH à l'eau basique (8,7) et présente un taux de carbonates très faible (1,4 g.kg^{-1}). Ce matériau est pauvre en matières organiques (2,2%) comme pour le béton. Le taux ce carbone est faible (1,3 g.kg^{-1}) dont 87% est sous forme organique. La teneur en N (0,46 g.kg^{-1}) dans ce matériau est faible. Ce produit est quasiment dépourvu de P assimilable (proportion à la limite de la détection (qui est fixée à 0,005 g.kg^{-1}). Il présente la CEC la plus faible de tous les matériaux : 1,49 cmol^{+}.kg^{-1}.

Mélange de déchets du bâtiment
C'est le matériau qui présente le pH le plus basique (10,8) et avec un taux de carbonates aussi élevé que pour les bétons avec 56% de ces carbonates qui sont actifs. Ce matériau est pauvre en matières organiques (1,9%) et présente un taux faible de carbone organique avec 32,6 %. La teneur en N est proche de celle du béton avec 0,053%. Le produit est légèrement plus riche en P assimilable que le béton avec 0,089 g.kg^{-1}. Sa CEC est néanmoins plus faible avec 3,96 cmol^{+}.kg^{-1}.

Déchets de la fabrication des briques
Le produit est basique avec une valeur de 9,3 et un taux de carbonates plus élevé que pour les déchets de bâtiment avec une valeur de 207 g.kg^{-1} dont seulement 12% sont actifs. Ce matériau est le plus pauvre en matières organiques (0,3%) et ne présente pas de carbone organique. La teneur en N est la plus faible de tous les matériaux avec seulement 0,007%. Le produit est plus pauvre en P assimilable que le béton et les déchets du bâtiment avec 0,026 g.kg^{-1}. Sa CEC est très faible et proche de celle des terres d'excavation avec 1,58 cmol^{+}.kg^{-1}.

Ballast
Il présente un pH légèrement basique avec une valeur de 7,8 et un taux de très faible 2,2 g.kg^{-1}. Ce matériau, comme la brique est très pauvre en matières organiques (0.4%) mais présente 99% de carbone de nature organique sur 18,5 g.kg^{-1}. La teneur en N est faible avec une valeur proche de celle correspondant aux déchets du bâtiment 0,55 g.kg^{-1}. Le produit est plus pauvre en P assimilable que le béton et les déchets du bâtiment mais légèrement plus riche que les briques avec 0,041 g.kg^{-1}. Sa CEC est faible avec 5,8 cmol^{+}.kg^{-1}.

III.3.e. Evaluation environnementale (tests de lixiviation, écotoxicologiques et pathogènes)

Test de lixiviation

Le test de lixiviation normalisé NF EN 12457-2 a été utilisé dans cette étude sur les échantillons bruts ou tamisé à 4 mm comme indiqué dans le tableau 4. En ce sens il a été dérogé à la norme pour plusieurs matériaux dont le pourcentage de refus à 4 mm était supérieur à 5 % et pour lesquels le broyage était difficile à réaliser du fait de la nature du matériau ou de sa forte hétérogénéité : cas du ballast, des déchets du bâtiment et des déchets provenant du nettoyage des rues. Les déchets de fabrication des briques sont apparus suffisamment homogènes pour considérer que la fraction inférieure à 4 mm soit représentative du matériau. Pour les déchets du bâtiment, les tests ont été réalisés sur le matériau brut en augmentant la prise d'essais (200 g dans 2 litres d'eau) compte-tenu de la granulométrie grossière des échantillons (12-40 mm pour les déchets du bâtiment). Enfin, dans certains cas il a été impossible de broyer totalement le refus à 4 mm en raison de la présence de morceaux de végétaux (compost et déchets verts).

Le Tableau 32 présente la synthèse des résultats du test de lixiviation exprimés en mg/kg de matériau sec. Il présente également les valeurs limites pour l'admission en installation de stockage pour déchets inertes fixées par l'arrêté du 28 octobre 2010.

Les essais ont été réalisés en triple, les résultats présentés sont la moyenne de ces 3 essais.

Compost NFU 44-095
L'éluat se caractérise par un pH élevé, proche de 8, et il contient une fraction soluble importante représentant près de 40 g/kg de matériau. Les taux de potassium et de chlorure extrait sont importants (respectivement 3840 et 2495 mg/kg), ainsi que celui de carbone organique (10240 mg/kg). Le zinc (6,3 mg/kg), le cuivre (5,8 mg/kg), l'arsenic (2,2 mg/kg) et le mercure (0,02 mg/kg) extraits dépassent les seuils admissibles pour les déchets inertes (de même que la fraction soluble, les chlorures et le COT).

Bétons de démolition
Le pH de l'éluat est très élevé, supérieur à 11 et la fraction soluble est relativement importante (16280 mg/kg). Les substances les plus extraites sont le calcium (2052 mg/kg), le soufre (1500 mg/kg) et les sulfates (4146 mg/kg). Les concentrations en éléments traces et en matières organiques sont très faibles dans les lixiviats, souvent inférieures aux limites de quantification.

Boues de STEP
Les boues de STEP sont les matériaux qui relarguent la plus grande quantité de substances. Le pH des éluats est de 7,56, la conductivité et la fraction soluble sont très importantes (5957 µS/cm et 67,5 g/kg). Les taux de potassium (3595 mg/kg), de phosphore (1994 mg/kg) et de soufre (1791 mg/kg) sont assez élevés, de même que ceux de phosphates (4496 mg/kg), de sulfates (3568 mg/kg), de chlorures (1054 mg/kg) et de COT (28450 mg/kg). Le sélénium, le plomb, le zinc, le cuivre, le cadmium, l'arsenic, le nickel et l'indice phénol dépassent les seuils admissibles pour les déchets inertes, ainsi que le COT, les chlorures, les sulfates et la fraction soluble.

Déchets verts
Le pH de l'éluat est de 7,38, la fraction soluble est importante, 36,7 g/kg, et contient principalement du potassium (6880 mg/kg), des phosphate et des chlorures (respectivement 4496 et 1552 mg/kg). Le COT est élevé (11080 mg/kg), ainsi que l'indice phénol (13 mg/kg) et les chlorures (1552 mg/kg), et ils dépassent les seuils des déchets inertes. Les quantités d'éléments traces extraites sont généralement faibles ou proches de la limite des déchets inertes pour le zinc (4,1 mg/kg), le cuivre (2,3 mg/kg) et l'arsenic (0,55 mg/kg).

Sous-produits de l'industrie papetière
Le pH de l'éluat est assez élevé, 7,85, mais la fraction soluble est peu importante, 7490 mg/kg, et contient principalement du carbone organique (1848 mg/kg) et du calcium (1639 mg/kg). Les quantités d'éléments traces extraits sont très faibles, souvent inférieures aux limites de quantification.

Déchets provenant du nettoyage des rues
Le pH des éluats est élevé, 7,83, et la fraction soluble est faible, 6080 mg/kg. Les substances extraites sont principalement le potassium (1186 (mg/kg) et le COT (1659 mg/kg). Les concentrations en éléments traces sont peu élevées sauf pour le zinc (18 mg/kg) et dans une moindre mesure le cuivre (2,5 mg/kg). Ces 2 métaux, dont la présence est liée au trafic routier (usure des pneus et des garnitures de freins), dépassent les seuils des déchets inertes, ainsi que le COT, l'indice phénol et la fraction soluble.

Terres excavées
Le pH est assez élevé, 8,05, mais la fraction soluble est très faible, 61 mg/kg. Tous les paramètres sont inférieurs aux seuils des déchets inertes, les quantités relarguées sont très faibles, inférieures aux limites de quantification des éléments traces.

Mélange de déchets du bâtiment
Le matériau est grossier et hétérogène, les résultats d'analyses sont assez dispersés. Le pH est très basique, supérieur à 11, et la fraction soluble est importante, 18330 mg/kg. Une quantité très importante de sulfates (9470 mg/kg), et de soufre (3620 mg/kg), est extraite ainsi que du calcium (4980 mg/kg). Mis à part la fraction soluble et les sulfates, tous les paramètres sont inférieurs aux seuils des déchets inertes, en particulier les éléments traces sont inférieurs aux limites de quantification.

Déchets de la fabrication des briques
Les résultats obtenus pour les déchets de briques sont très proches de ceux obtenus pour les déchets du bâtiment, le pH est un peu moins élevé, 9,37 et on note la présence d'arsenic (0,87 mg/kg), de sulfates (9520 mg/kg) et de fluorures (27 mg/kg) qui dépassent les seuils des déchets inertes.

Ballast
Le pH est proche 8 pour le ballast, la fraction soluble est peu importante, 323 mg/kg. Très peu d'éléments sont relargués, tous les paramètres sont inférieurs aux déchets inertes et la plupart des éléments traces sont inférieurs aux limites de quantification.

En ce qui concerne les matériaux grossiers (béton, déchets du bâtiment et briques), mis à part la fraction soluble, tous les paramètres sont inférieurs aux seuils des déchets inertes, sauf les sulfates pour le béton et les déchets du bâtiment, l'arsenic, les sulfates et les fluorures pour les déchets de fabrication des briques. On notera cependant que le pH des éluats est généralement élevé, compris entre 7,5 et 11.
Parmi les matériaux fins, les terres excavées ne présentent aucune contamination mais le pH des éluats est assez élevé, de l'ordre de 8, et les déchets provenant du nettoyage des rues relarguent du zinc, du cuivre et l'indice phénol des éluats est supérieur au seuil des déchets inertes.
Parmi les matériaux fins et riches en matières organiques, les boues de STEP et le compost relarguent le plus de contaminants, et à des niveaux supérieurs aux seuils des déchets inertes. Les déchets verts et les sous-produits de l'industrie papetière sont faiblement contaminés, seuls les chlorures, le COT, l'indice phénol et la fraction soluble dépassent les seuils.

Tableau 32 : Synthèse des résultats du test de lixiviation

Paramètres	Unité	Compost NFU 44-095	Béton	Boues de step	Déchets verts	Sous produits de l'industrie papetière	Pneus usagés*	Déchets provenant du nettoyage des rues	Terres excavées	Mélange de déchets du batiment*	Déchets de fabrication des briques	Ballasts	Déchets inertes arrêté du 28/10/10
pH	-	7.90	11.04	7.56	7.38	7.85	7.48	7.83	8.05	11.03	9.37	7.99	-
Conductivité	µS/cm	2354	997	5957	2284	597	36	635	75	1831	1671	79	-
Frac. Soluble	mg/kg	39380	16280	67490	36720	7490	705	6060	62	18330	17090	323	4000
Al	mg/kg	50	8.7	22	13	1.6	<1	5.2	1.9	4.5	2.8	7.9	-
Ca	mg/kg	568	2051	805	794	1643	45	477	100	4980	4540	119	-
Fe	mg/kg	134	0.85	234	23	8.1	3.0	9.9	1.4	<0.3	<0.05	19	-
Mg	mg/kg	124	0.85	493	284	40	1.3	105	15	2.6	15	18	-
Mn	mg/kg	8.2	<0.02	0.79	7.4	0.26	0.32	2.1	0.02	<0.02	<0.01	0.66	-
P	mg/kg	706	<1	1999	752	6.1	<1	39	<1	<1	<1	4.4	-
K	mg/kg	3840	222	3600	6885	20	11	1190	12	96	49	15	-
Si	mg/kg	567	107	147	248	26	2.9	86	49	97	46	37	-
Na	mg/kg	924	91	897	213	70	12	123	20	46	5.5	11	-
S	mg/kg	513	1500	1795	240	39	11	86	17	3620	3500	23	-
Ti	mg/kg	0.72	<0.07	0.19	0.41	0.3	<0.02	0.11	<0.02	<0.02	<0.02	0.22	-
Sb	mg/kg	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.06
Ba	mg/kg	1.6	0.28	1.1	2.1	0.56	0.09	0.42	0.06	0.19	0.29	0.11	20
Mo	mg/kg	0.26	0.08	0.51	<0.02	0.05	<0.03	0.09	<0.02	<0.04	0.44	0.06	0.5
Sn	mg/kg	0.25	<0.01	0.32	0.03	<0.01	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-
Se	mg/kg	<0.07	<0.05	0.71	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.07	<0.05	0.1
Pb	mg/kg	0.38	<0.05	0.85	0.36	<0.05	<0.05	0.52	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.5
Zn	mg/kg	6.3	<0.05	9.9	4.1	1.2	2.9	18	<0.65	<0.05	<0.05	0.55	4
Cr	mg/kg	0.12	0.26	<0.06	0.09	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.13	0.20	<0.05	0.5
Cu	mg/kg	5.8	0.26	17.8	2.3	0.10	0.04	2.6	<0.02	0.08	0.04	0.23	2
Cd	mg/kg	0.03	<0.005	0.09	0.01	<0.005	<0.005	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.04
As	mg/kg	2.2	<0.05	1.7	0.55	<0.05	<0.05	0.2	<0.05	<0.05	0.87	<0.05	0.5
Hg	mg/kg	0.02	<0.005	0.02	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01
Ni	mg/kg	0.29	<0.05	2.3	0.35	<0.05	<0.05	0.3	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.4
Cl-	mg/kg	2495	83	1054	1552	99	<50	253	62	100	<50	<50	800
F-	mg/kg	3.2	3.1	<2.5	<2.1	<2.2	<2	2.3	10	5.0	27	3.0	10
SO4	mg/kg	694	4146	3568	427	<54	<50	161	51	9470	9520	90	1000
NO3	mg/kg	<10	42	<11	<10	<10	<10	<10	13	100	<10	35	-
NO2	mg/kg	16	2.1	14	13	0.73	0.20	3.8	0.37	0.70	0.23	0.10	-
PO4	mg/kg	1974	0.4	4500	1890	2.3	0.38	71	0.30	0.18	1.1	12	-
COT	mg/kg	10240	71	28450	11080	1848	115	1655	15	100	23	52	500
Hydrocarbures	mg/kg	<1	<1	1.9	<2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-
Indice phenol	mg/kg	0.16	<0.1	254	13	1.8	0.15	1.9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1

*** Essais réalisés sur matériaux bruts**

Ecotoxicité

Essais sur des organismes terrestres

Les essais de phytotoxicité sur l'orge et le cresson ainsi que les essais d'évitement vers de terre ont été menés sur les matériaux suivants : Boue de papeterie, boue de STEP séchée, compost de boue, balayage de rue et terre excavée.

Évaluation de l'innocuité vis-à-vis de végétaux supérieurs.

Afin de pouvoir comparer les résultats des essais menés en parallèle sur les matériaux, les résultats des modalités témoins ont été arbitrairement placés à 100.

Les résultats d'émergence sont présentés sur la **Figure 31** et la biomasse sur la **Figure 32**.

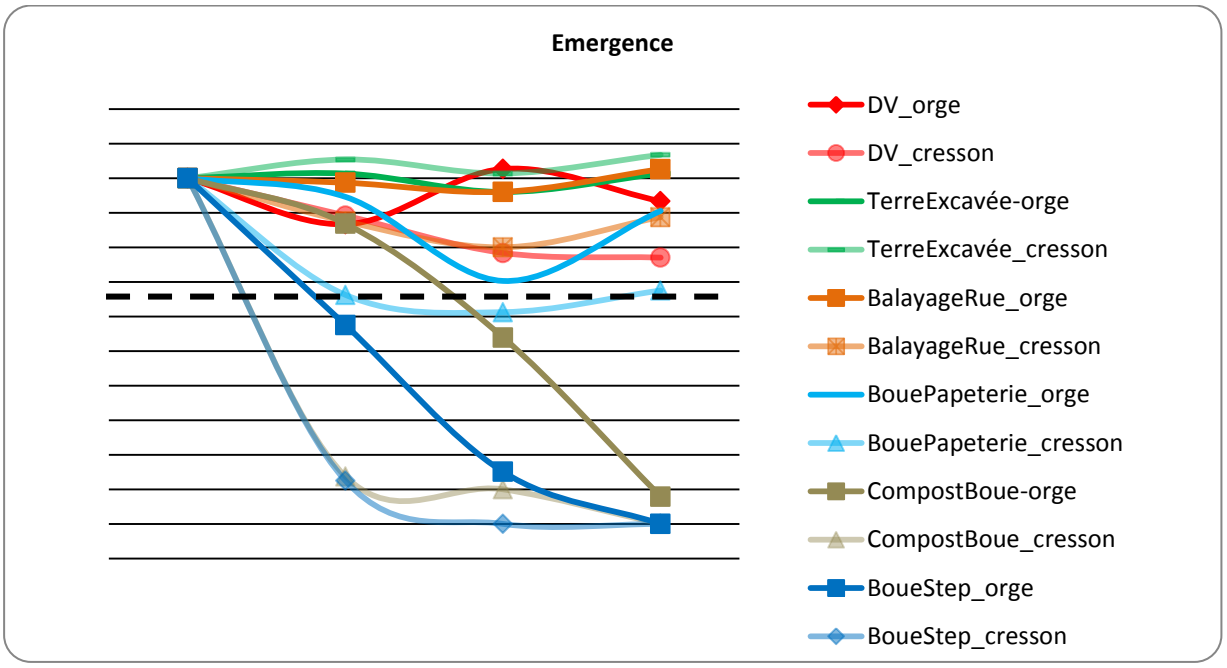


Figure 31 : Pourcentage d'émergence de l'orge et du cresson pour les différents matériaux étudiés (norme XPU44-167 modifiée)

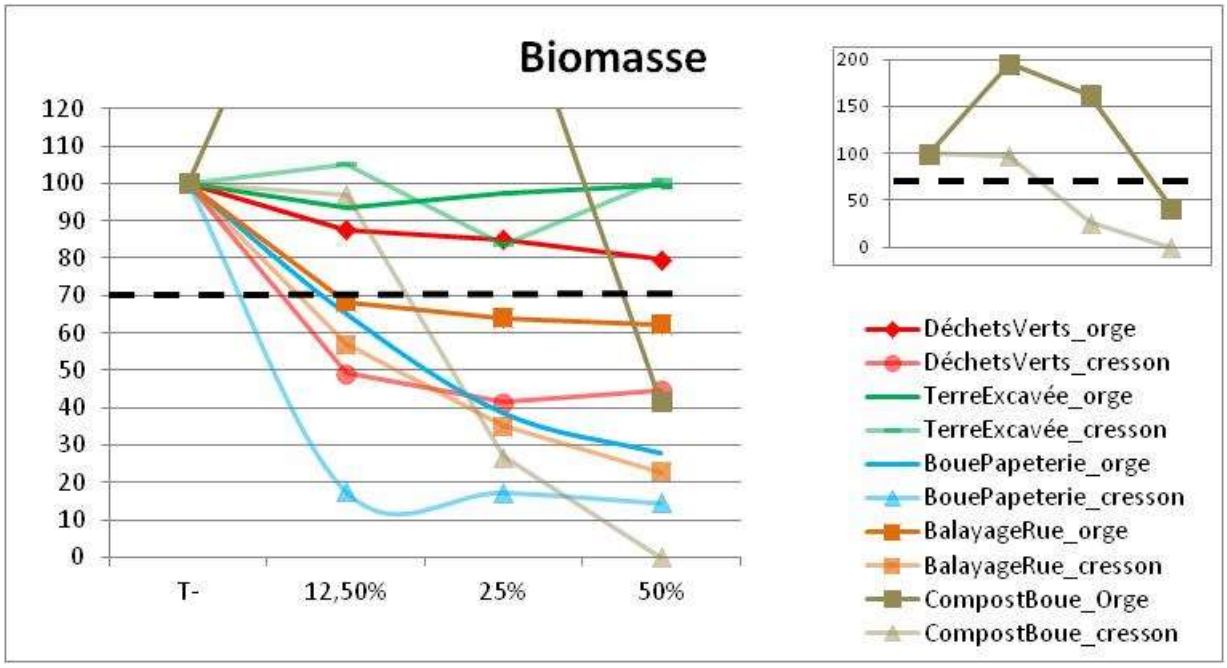


Figure 32 : Biomasse (exprimée en %) de l'orge et du cresson pour les différents matériaux étudiés (norme XPU44-167 modifiée)

Les matériaux "déchets verts", "terre excavée" et "balayage de rue" n'ont pas d'effet négatif sur l'émergence de l'orge ou du cresson. Pour l'apport le plus faible (12,5% de matériau dans le substrat artificiel), on observe une diminution supérieure à 30% de l'émergence du cresson et de l'orge pour les matériaux "boue de step", et "compost de boue". La boue de papeterie entraine aussi l'inhibition de la germination du cresson supérieure à 30% dès la première dose testée (12,5%).
Selon la norme ISO 17616 (2008), un sol ou un matériau de sol peut être considéré comme toxique s'il entraine une inhibition de croissance sur végétaux supérieure à 30%. Dans cette norme, la méthode préconisée (NF EN 11269-2) est proche de celle que nous avons utilisé dans nos esssais. Nous avons ainsi choisi cette valeur de 30% d'inhibition afin de distinguer les matériaux testés.

Évaluation de l'innocuité vis-à-vis des vers de terre.
La Figure 33 ci-dessous présente les résultats de l'essai d'évitement sur les vers de terre. On constate que seuls les matériaux "boue STEP" et "compost de boue" provoque un évitement, dès un apport de 25% pour la boue et à 50% pour le compost. Pour les autres matériaux, les vers se retrouvent majoritairement dans les mélanges avec les matériaux plutôt quand dans le compartiment témoin.

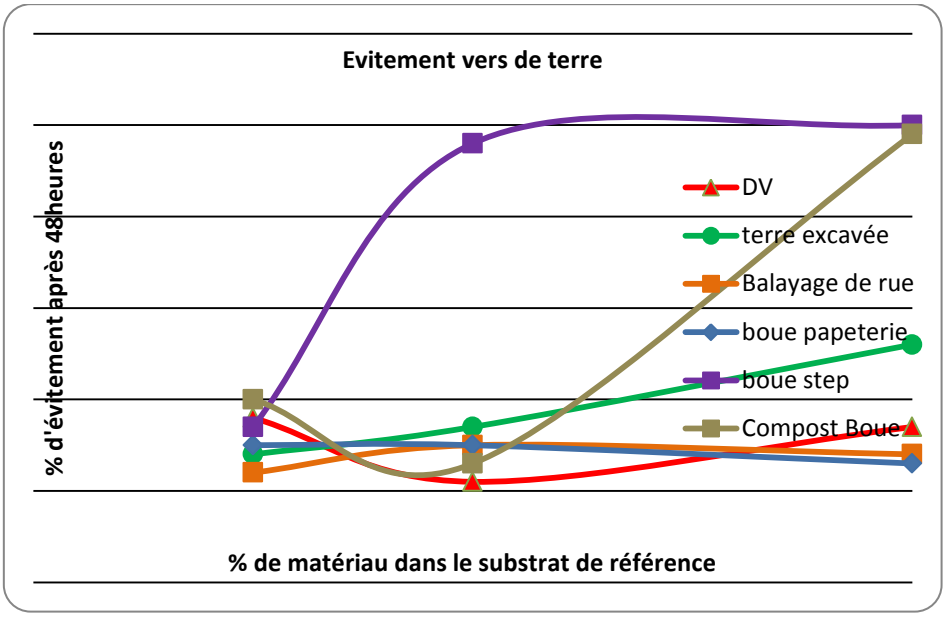


Figure 33 : Pourcentage d'évitement en fonction du pourcentage de matériau apporté au substrat de référence

Essais sur des organismes aquatiques
L'innocuité de l'ensemble des lixiviats des matériaux a été évaluée sur la lentille d'eau et la daphnie.

Évaluation de l'innocuité vis-à-vis de la lentille d'eau
La Figure 34 ci-dessous présente les résultats de l'essai sur les lentilles d'eau (*Lemna minor*). Différentes gammes de dilution des lixiviats dans la solution nutritive témoin ont été testées en fonction de la toxicité des lixiviats.
On constate que seuls les lixiviats des matériaux "bâtiment" et "brique" entrainent une augmentation du nombre de frondes à partir de 25% d'apport de lixiviat. Cette augmentation n'est cependant pas significative.

Les lixiviats des matériaux "boue de STEP", "déchets verts (DV)", "compost de boue" et "boue de papeterie" entrainent des inhibitions de croissance supérieures à 25%. Ces inhibitions de croissance sont significatives à partir de 10% pour le lixiviat de boue de STEP, 25% pour les lixiviats du compost de boue et de la boue de papeterie et à partir de 50% pour le lixiviat du déchet vert.

Dans une moindre mesure, les lixiviats des autres matériaux ont aussi parfois entrainé des inhibitions de croissance. Cependant, il faut noter que les lixiviats pouvaient présenter, même après ajustement (Tableau 30) des pH parfois supérieurs à 9,5 ce qui ne correspond pas aux conditions idéales de croissance de la lentille d'eau. Ceci a été observé pour le lixiviat de ballast et de la terre excavée (quel

que soit le pourcentage d'apport), et pour les lixiviats de brique et de déchets du bâtiment aux dilutions les plus faibles (0,25% et 1,25%).

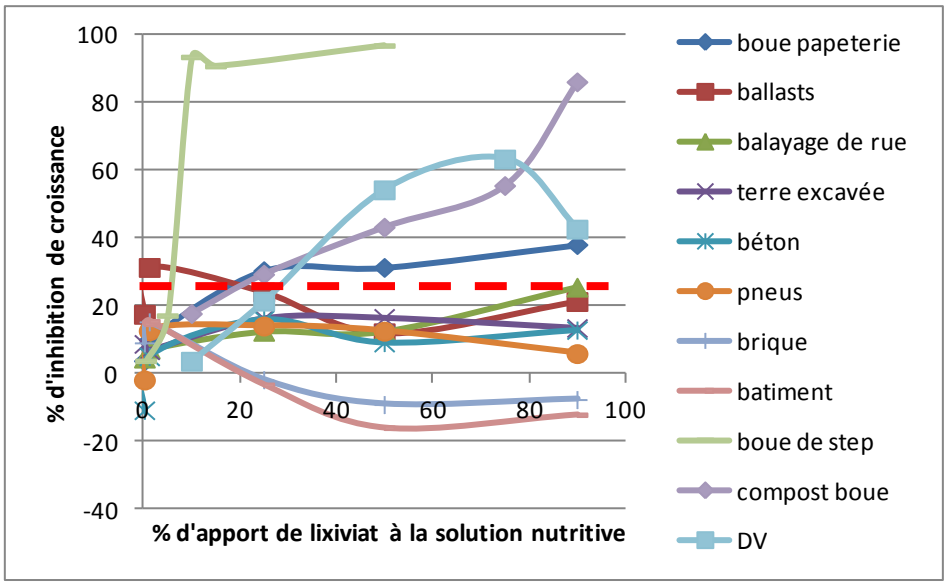


Figure 34 : Pourcentage d'inhibition de croissance (nombre de frondes après 7 jours de contact) des lentilles d'eau en fonction du pourcentage d'apport du lixiviat des matériaux étudiés à la solution nutritive témoin. La ligne en pointillé représente un taux d'inhibition de 25%

Tableau 30 : Lixiviats dont les pH ont été ajustés avant les essais

Matériau	pH initial du lixiviat	pH après ajustement
Béton	11,14	6,91
Bâtiment	10,44	5,95
Brique	9,34	6,68
Compost de boue	8,2	7,36
Boue de STEP	8,06	7,9

Évaluation de l'innocuité vis-à-vis de la daphnie

Le pH du lixiviat peut être modifié afin de pouvoir réaliser l'essai. Dans ces essais, seuls les pH des lixiviats réalisés à partir du béton et des déchets du bâtiment ont été ajustés à 8,5 (les valeurs initiales étaient respectivement de 10,4 et 10,7).

La Figure 35 présente les résultats obtenus avec les lixiviats des différents matériaux sur les daphnies. On note que les lixiviats entrainant le plus d'effet toxique sont, par ordre croissant de toxicité, les lixiviats de déchets verts, de compost de boue et de boue de STEP.

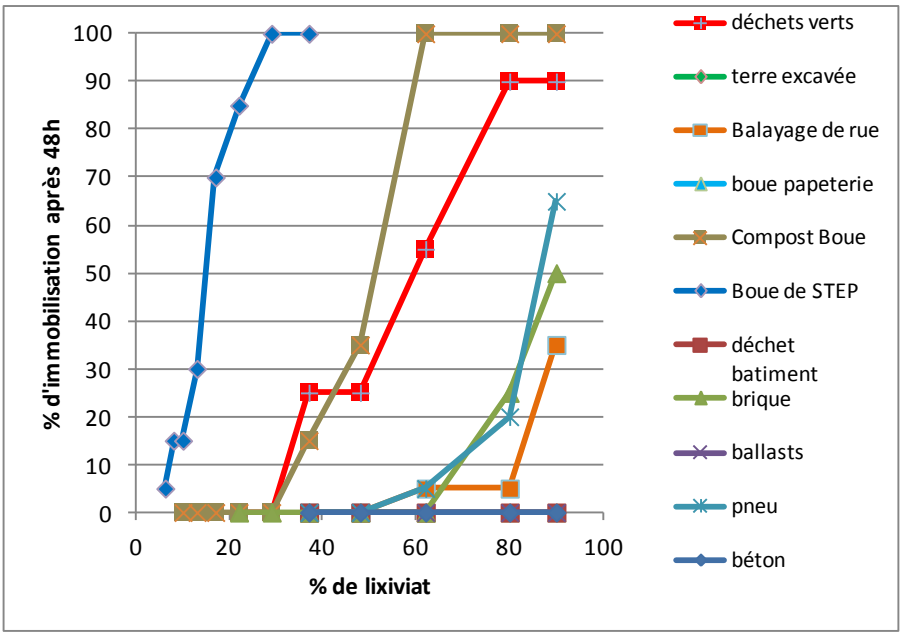


Figure 35 : Pourcentage d'immobilisation des daphnies en fonction du pourcentage d'apport du lixiviat dans la solution nutritive

Les valeurs des différents descripteurs toxicologiques sont présentées dans le Tableau 33.

Tableau 33 : Valeurs des NOEC et EC50 des lixiviats des matériaux étudiés (NT : non toxique)

Descripteur toxicologique	bâtiment	brique	DV	terre excavée	Boue de papeterie	boue de STEP
CE 50i-24h	NT à 90 %	>90%	58,1% (52,5-64,4)	NT à 90%	NT à 90%	16,9% (15,2-18,7)
CE 50i-48h	NT à 90 %	89,3% (84,2->100)	56% (50,6-62,0)	NT à 90%	NT à 90%	14% (12,6-15,6)
NOEC-48h 10%	90%	80%	48%	90%	90%	10%

	béton	ballasts	compost de boue	balayage de rue
CE 50i-24h	NT à 90%	NT à 90%	47,5% (44,1-51,3)	> 90%
CE 50i-48h	NT à 90%	NT à 90%	47,5% (44,1-51,3)	> 90%
NOEC-48h 10%	90%	90%	37%	80%

Dans le domaine des déchets, le conseil des communautés européennes a défini 14 propriétés qui rendent les déchets dangereux dont le danger écotoxique, le critère H14 (Directive européenne 91/689 relative aux déchets dangereux, 1991) repris en droit français par le décret n°97-517 du 15 mai 1997 relatif à la classification des déchets dangereux.

Une méthode a été proposée par le MEDD en 1998 puis rediscutée en 2000 pour la réalisation d'une évaluation de la dangerosité de déchets en fonction des résultats d'essais d'écotoxicité. Ainsi, la caractérisation biologique des matrices solides requiert 2 approches différentes et complémentaires :

- approche directe : étude sur des échantillons solides,
- approche indirecte : étude sur des extraits aqueux – ou éluats.

En avril 2000, le projet sur les critères et les méthodes d'évaluation de l'écotoxicité des déchets, en discussion au Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD), a émis des seuils provisoires d'acceptabilité pour le classement des déchets d'après leur dangerosité.

« Tout déchet sera considéré comme écotoxique lorsque :

- l'extrait aqueux introduit à moins de 1 % dans le milieu d'essai entraînera une inhibition supérieure à 20 % de la reproduction de *Ceriodaphnia dubia*,
- ou le déchet introduit à moins de 10 % dans le substrat d'essai entraînera un effet inhibiteur sur l'émergence ou la croissance de la laitue supérieure à 50 % »

Etant donné que cette méthodologie est toujours en discussion, les seuils provisoires sont les suivants :

- Pour la toxicité sur éluats issus de lixiviation des déchets, le seuil pour les essais aigus est de 10 % pour la CE-50 et pour les essais chroniques, de 1 % pour la CE-20.
- Pour les essais sur déchet brut, le seuil est de 10 % pour la CE 50.

La Figure 36 présente les résultats de l'essai de toxicité aiguë réalisé sur éluat sous forme d'histogramme, en considérant le seuil de 10 %. Ainsi, il apparaît que les lixiviats testés ne sont pas toxiques au regard de ce critère H14.

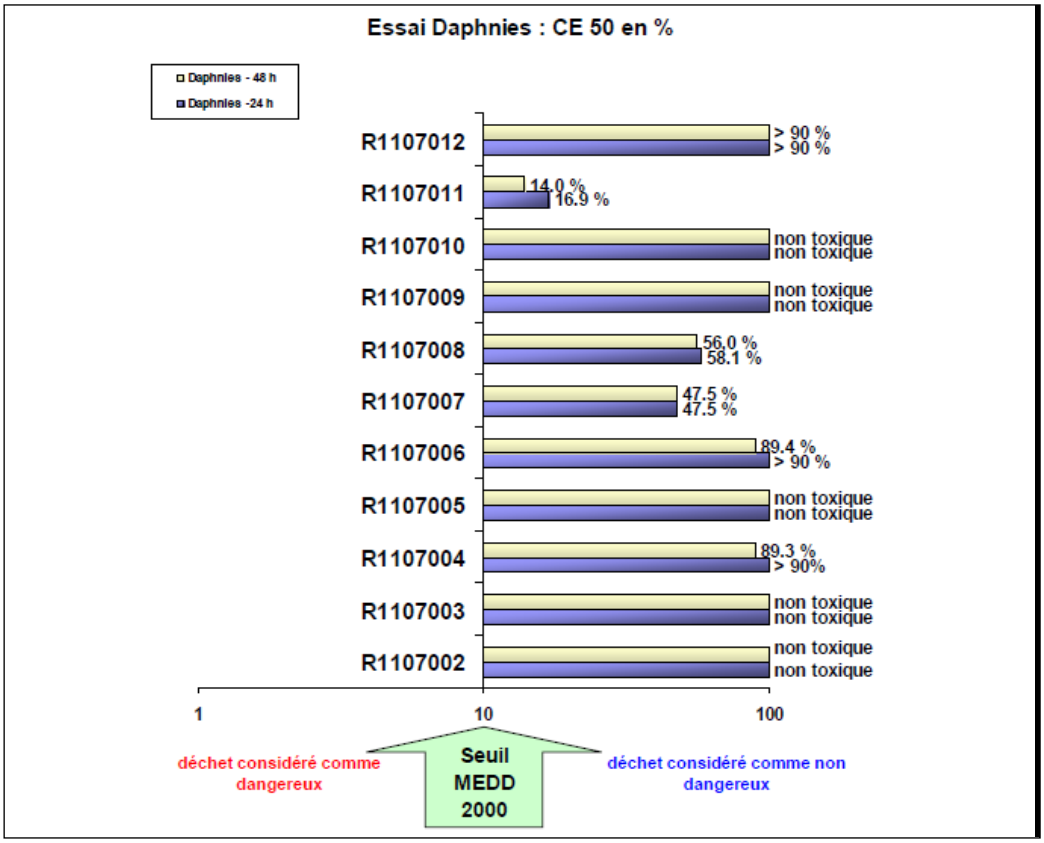


Figure 36 : Résultats de l'essai de toxicité aiguë réalisé sur éluat

Agents pathogènes

Les résultats des différentes analyses sont présentés dans le tableau ci-après.
Dans le cadre réglementaire actuel, sans référentiel pour la construction de sol, il n'est pas possible d'acter une évaluation précise du risque lié aux agents pathogènes. Selon une lecture propre aux supports de culture, la norme NF U 44‑551 exige que seules les salmonelles soient recherchées, si le support n'est pas utilisé pour des cultures à consommer crues. La valeur-limite est une absence de

salmonelles pour 1 g d'échantillon. Dans le cadre de cette étude, on retrouve des salmonelles uniquement dans les déchets verts broyés seuls.

Tableau 34 : Résultats d'analyses agents pathogènes pour 5 matériaux individuels

		1	2	3	4	5		
	unité / Réf.	Déchets de rue	Déchets verts	Compost	Sous produits de papeterie	Boue de station d'épuration	Min	Max
Microorganismes à 30°C	par g	1,40E+07	2,20E+08	5,50E+07	1,10E+07	6,80E+07	1,10E+07	2,20E+08
Levures et moisissures	par g	2,90E+04	4,30E+05	2,90E+04	4,20E+04	2,10E+04	2,10E+04	4,30E+05
E. coli sur TBX	par g	< 4000	> 10000	< 100	< 1000	< 1000	< 100	> 10000
Aspergillus	par g	< 1000	110000	< 1000	< 4000	< 1000	< 1000	1,10E+05
Staphylocoques à coagulase	par g	< 1000	< 1000	< 1000	< 10	< 1000	< 10	< 1000
Entérocoques fécaux NPP	NPP par g	2873	829940	15870	2027	4840	2027	8,30E+05
Clostridium perfringens(végétative)	par g	6000	220	< 40	150	5600	< 40	6,00E+03
Clostridium perfringens(spores)	par g	< 10	60 estimé	< 10	< 10	< 10	< 10	60 estimé
Salmonelles	dans 25 g	Absence	Présence	Absence	Absence	Absence	Absence	Présence
Listeria monocytogenes	dans 25 g	Présence	Présence	Absence	Présence	Absence	Absence	Présence
Larves de nématodes	dans 25 g	Présence	Présence	Absence	Absence	Absence	Absence	Présence
Œufs de nématodes	dans 25 g	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence

IV.Formulation des mélanges (=Tâche 3)

L'objectif de ce travail est de fournir des réponses aux questions suivantes :

- Peut-on créer un substrat fertile exclusivement à partir de déchets, et qui se comporterait comme un sol naturel ?
- Est-il possible de décrire la variation des propriétés physico-chimiques des mélanges constitués de différentes proportions de déchets par des modèles appropriés ?
- Peut-on prédire la fertilité des mélanges à partir de la connaissance des caractéristiques de leurs matériaux constitutifs ?

Dans ce chapitre, on tentera alors notamment (i) d'identifier quels sont les paramètres qui permettent d'évaluer la fertilité des sols construits et (ii) de comprendre comment la formulation des mélanges de déchets influence leurs propriétés physico-chimiques (Figure 37).

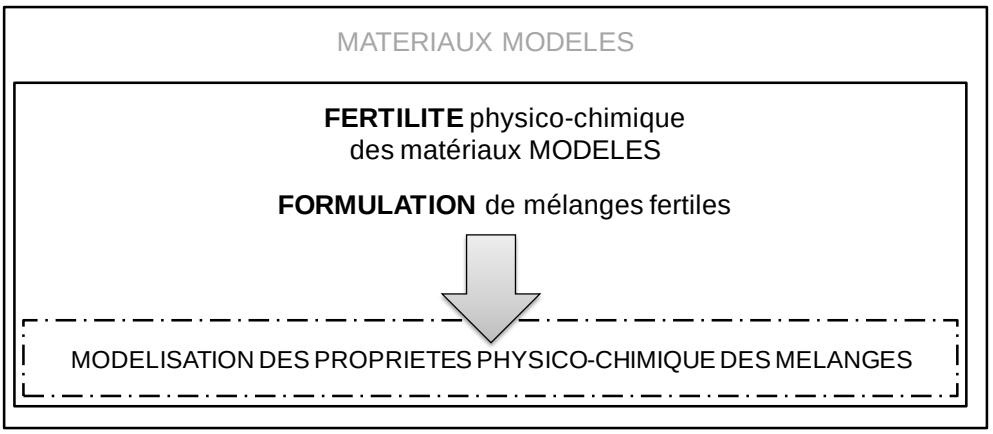


Figure 37 : Démarche de formulation de matériaux pour la construction de sols

IV.1. Modèle de formulation et d'estimation des propriétés des mélanges

IV.1.a. Méthode de sélection des mélanges

Afin de réduire la complexité des systèmes, le nombre de matériaux mélangés entre eux est limité à un nombre maximum de 3. En utilisant 11 matériaux, on obtient 10 !/ (2 ! x 8 !) = 45 combinaisons binaires et 10 !/ (3 ! x 7 !) = 120 combinaisons ternaires possibles.
Nous avons appliqué un premier filtre de sélection afin d'éliminer les associations aberrantes en regard de la construction de sols fertiles. Ainsi, les combinaisons binaires entre 2 matériaux de même nature (organique/organique ou minéral/minéral) ont été exclues.
Pour des raisons techniques en lien avec le dimensionnement de l'essai, le nombre de combinaisons à tester a finalement été limité à 25 : 15 combinaisons binaires et 11 ternaires. Les mélanges binaires ont été préparés à différents ratios répartis de la façon suivante : 0/100, 20/80, 50/50, 80/20 et 100/0 (volume matériau 1 / volume matériau 2). Pour les mélanges ternaires, le modèle des mélanges terre-pierre a été suivi en intégrant systématiquement 60 % (v/v) de matériaux minéraux grossiers (BA, BE et DD) (Grabosky *et al.*, 2002) qui sont distincts des terres et des BR considérés comme fragiles mécaniquement. Ces 60% de matériaux sont additionnés de 40 % (v/v) de mélanges binaires constitués de 10, 20 ou 30 % (volume du matériau 1 / volume matériau 2) de 2 autres matériaux organiques (CO, BS, DV, DR SP) ou terreux (TA, TB), voir Tableau 34. Cette procédure a permis de préparer au total 75 mélanges contrastés en composition (25 combinaisons) et à différents ratios.

Tableau 35 : Mélanges testés pour chaque type de déchet

	Mélanges binaires	Mélanges ternaires
Déchets organiques et déchets minéraux	TA/CO, TA/DV, TA/SP, TA/DR, TA/BS, TB/CO, TB/DR, BR/CO, BR/SP, BA/CO, BA/SP	TA/BE/DV, TA/BE/DR, TA/BE/BS, TA/DB/CO, TA/BA/DR, TA/BA/BS, TB/BA/SP, TB/BA/DR, TB/BA/BS, BA/DR/CO*
Déchets minéraux	TA/BR, TA/BE, TA/DB, TA/BA	

Les déchets étant : le ballast (BA), le béton (BE), les briques (BR), les boues de STEP (BS), le compost (CO), les déchets du bâtiment (DB), les déchets de balayage de rue (DR), les déchets verts (DV), les sous-produits papetiers (SP), les terres d'excavation acide (TA) et basique (TB).

IV.1.b. Procédure de mélange des matériaux

Dans un premier temps, les matériaux ont été séchés à l'air libre. Les matériaux grossiers (BA, BE, BR et DD) ont été broyés à 5 mm puis les 11 matériaux ont été tamisés à sec, à 5 mm. Pour effectuer les mélanges, des flacons cylindriques de 2L (Nalgene, diamètre : 100 mm, hauteur : 250mm) ont été utilisés. La taille des flacons a été sélectionnée afin que le diamètre maximum de grains des matériaux mélangés soit au moins 10 fois plus petite que le diamètre de l'éprouvette d'essai (Paute *et al.*, 1994). Les matériaux à mélanger ont été humidifiés à 0.8 $g.g^{-1}$ de leur teneur en eau à pF 2 (potentiel -10 kPa), mélangés et homogénéisés manuellement durant 5 minutes avant de les introduire dans les flacons de 2L. Les flacons sont alors placés successivement verticalement (16 rpm durant 10 minutes) et horizontalement (16 rpm, durant 10 minutes) dans un agitateur rotatif (Guyon & Troadec 1994; Khakhar 2011; Severson *et al.*, 2007).

IV.1.c. Méthodes de caractérisation des mélanges et modélisation de leurs propriétés

Pour caractériser la fertilité des mélanges, huit paramètres ont été identifiés comme les plus représentatifs de la fertilité physico-chimique des mélanges : C_{tot}, N_{tot}, CEC, P_{Olsen}, pH, masse volumique apparente, capacités de rétention en eau à la capacité au champ (-10 kPa) et au point de flétrissement (-1600 kPa). Ces paramètres sont mesurés pour les 75 mélanges sélectionnés et les matériaux seuls qui sont caractérisés à nouveau, dans les mêmes conditions que les mélanges. Seule la mesure de masse volumique apparente a dû être modifiée et adaptée.
Les propriétés des mélanges de matériaux ont été modélisées en collaboration avec F. Fournier du Laboratoire Réaction et Génie des Procédés (LRGP) (Matlab, R2010a.). Un modèle a été déterminé pour chaque caractéristique (C_{tot}, P_{Olsen}, CEC, pH, teneur en eau, masse volumique apparente). Les données initiales des caractéristiques des matériaux parents ont été utilisées afin d'estimer les propriétés des mélanges de matériaux. Dans un premier temps, il s'est avéré que les modèles basés sur les bilans de matière ne permettaient pas de prédire l'évolution de certains paramètres comme le C.

Ainsi, dans un second temps, les termes (modèles) linéaires et quadratiques ont été testés par l'équation ci-dessous :

$$\boldsymbol{Y = a_0 + \sum_{i=1}^{11} a_i X_i + \sum_{i=1}^{11} a_i X_i^2}$$

Chaque expérience a été répétée 3 fois. Les régressions linéaires ont été effectuées sur 86 individus incluant les matériaux seuls (11), les mélanges binaires (45) et les mélanges ternaires (30).
La fiabilité des modèles a été déterminée en utilisant les coefficients de corrélations R^2. Pour chaque caractéristique, les régressions ont été tracées et les coefficients de détermination ont été calculés.
Comme étape de validation, les modèles ont été testés sur un nouveau jeu de données, avec 4 matériaux présentant des caractéristiques initiales très différentes (CO, BS, DV, et DR), Tableau 35. Douze mélanges (4 binaires et 8 ternaires) ont été réalisés avec ces nouveaux matériaux et les données expérimentales ont alors été comparées aux données obtenues par les modèles. Ces matériaux ont été échantillonnés et préparés selon les mêmes protocoles que les autres matériaux.

Tableau 36 : Caractéristiques agronomiques des matériaux organiques ré-approvisionnés pour la 2ème phase de modélisation

Compost (COb), boues de STEP (BSb), déchets verts (DVb) et déchets de balayage de rue (DRb), Concentrations en azote total (Ntot), carbone total (Ctot), P disponible (POlsen), capacité d'échange cationique (CEC), le pH, la teneur en eau à pF2 et la masse volumique apparente (MVA)

	N_{tot} ($g.kg^{-1}$)	C_{tot} ($g.kg^{-1}$)	P_{Olsen} ($g.kg^{-1}$)	CEC ($cmol+.kg^{-1}$)	pH	pF 2 ($g.kg^{-1}$)	MVA ($g.cm^{-3}$)
CO(b)	27,8	234,0	0,6	60,5	7,6	734	0,8
BS(b)	57,2	338,9	1,2	50,1	6,4	1764	0,9
DV(b)	18,0	269,6	1,2	53,3	8,2	1284	0,5
DR(b)	3,8	96,4	0,1	13,1	7,5	245	1,2

IV.2. Courbes doses-réponses et modélisation

IV.2.a. Propriétés physico-chimiques des mélanges

Dans cette partie, les résultats exclusivement obtenus pour les mélanges sont présentés statistiquement par le biais de boxplots (Figure 38). Les valeurs de C_{tot} dans les 75 mélanges varient fortement entre 0,4 et 131 $g.kg^{-1}$ avec trois quarts des valeurs retrouvées entre 0,4 et 47,8 $g.kg^{-1}$. Concernant le P_{Olsen}, les concentrations pour les mélanges fluctuent entre 0,02 et 3,83 $g.kg^{-1}$ avec trois quarts des valeurs qui sont comprises entre 0,02 et 0,48 $g.kg^{-1}$. Le ratio de CEC s'échelonne de 0,97 à 43,3 $cmol^{+}.kg^{-1}$ avec la moitié des valeurs pour les mélanges se trouvant entre 3,14 et 9,68 $cmol^{+}.kg^{-1}$. Le pH des mélanges varie entre 5,7 et 9,9 avec trois quarts des valeurs entre 5,7 et 8,9. Concernant les propriétés physiques, la capacité de rétention en eau des mélanges se situe entre 89 et 814 $g.kg^{-1}$ avec trois quarts des valeurs situées entre 89 et 327 $g.kg^{-1}$. La masse volumique apparente présente une distribution homogène avec des valeurs réparties entre 0,8 et 1,6 $g.cm^{-3}$. La moitié des masses volumiques apparentes des mélanges testés sont comprises entre 1,1 et 1,4 $g.cm^{-3}$.

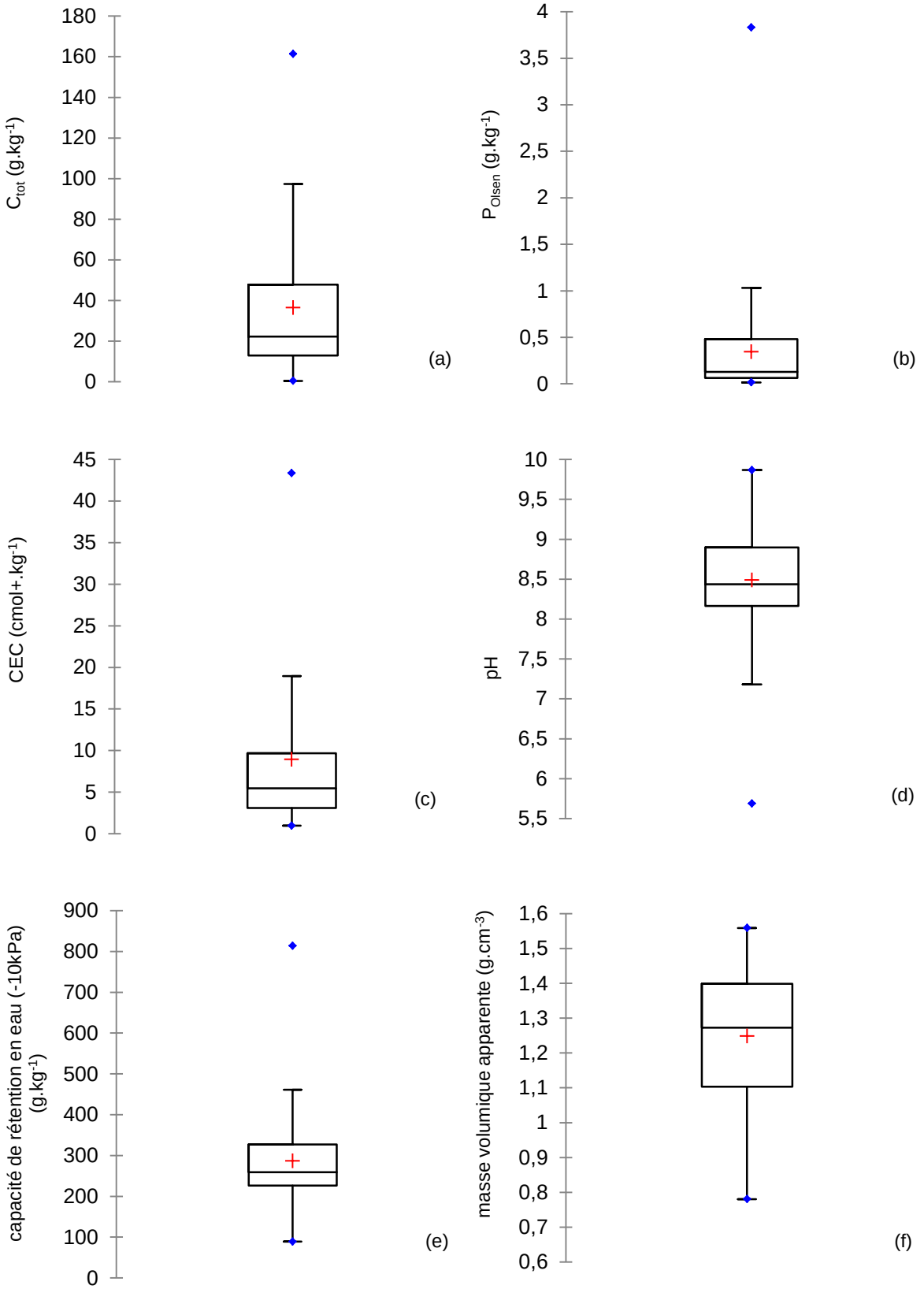


Figure 38 : Caractéristiques physico-chimiques des 75 mélanges de matériaux représentées sous forme de boxplots

IV.2.b. Courbes doses-réponses issues de l'addition d'un matériau à un autre

La représentation de courbes doses-réponses décrit la variation des propriétés physico-chimiques en fonction des différentes proportions de chaque matériau en mélange. Les données sont successivement présentées pour les paramètres de fertilités chimiques (Figure 39 et Figure 40) et physiques (Figure 41).

Pour tous les mélanges impliquant des matériaux organiques, les paramètres C_{tot}, P_{Olsen} et CEC peuvent être modélisés par des courbes de régressions représentant les données expérimentales avec un coefficient de corrélation $R^2>0,7$ et la qualité de la représentation est renforcée pour les mélanges ternaires ($R^2>0,8$) (Figure 39 (a) et (d) et Figure 40 (a)). Concernant les mélanges ternaires impliquant TA et les autres matériaux minéraux, C_{tot} peut être modélisé de façon significative pour les mélanges TA/BE et TA/DB ($R^2>0,8$) mais pas pour les mélanges TA/BA et TA/BR ($R^2>0,6$). Le P_{Olsen} et la CEC peuvent être modélisés avec une bonne représentation (par rapport aux données expérimentales) pour les mélanges impliquant BE, DB et BA ($R^2>0,8$). Pour les mélanges impliquant BR, la qualité de modélisation des variations de P_{Olsen} et la CEC est très hétérogène avec des coefficients de corrélation de 0,7 et 0,05 respectivement. Pour tous les mélanges réalisés avec des matériaux organiques, les courbes de régression tracées pour le pH ne représentent pas les données expérimentales avec un bon coefficient ($R^2<0,6$), essentiellement en raison du fait que la quasi intégralité des valeurs des pH des mélanges est proche de 8,5 (Figure 40 (d)). Néanmoins, le pH des mélanges binaires réalisés entre TA et les 4 autres matériaux minéraux (BA, BE, BR et DB) peut être modélisé avec un coefficient de corrélation correct ($R^2>0,7$) (Figure 40 (f)).

Pour tout types d'associations, les régressions tracées pour les paramètres de teneur en eau à -10 kPa et de la masse volumique apparente (MVA) concordent bien avec les données expérimentales, avec des coefficients de corrélation $R^2>0,7$ (Figure 41). Seuls deux mélanges (TA/BS, TA/DB) font exception à la règle, puisque que les régressions correspondent peu aux données expérimentales obtenues ($R^2<0,5$).

Bilan

L'ensemble des régressions linéaires tracées montrent que celles qui montrent le plus de correspondances avec les données expérimentales sont celles obtenues pour les paramètres P_{Olsen} et la teneur en eau (TE) à -10 kPa ($R^2>0,7$). Cependant, la qualité de prédiction par des courbes de régressions n'étant pas systématiquement satisfaisante, cela justifie l'exploration d'autres modèles afin de décrire l'évolution de la fertilité des mélanges en fonction des ratios de matériaux en mélanges.

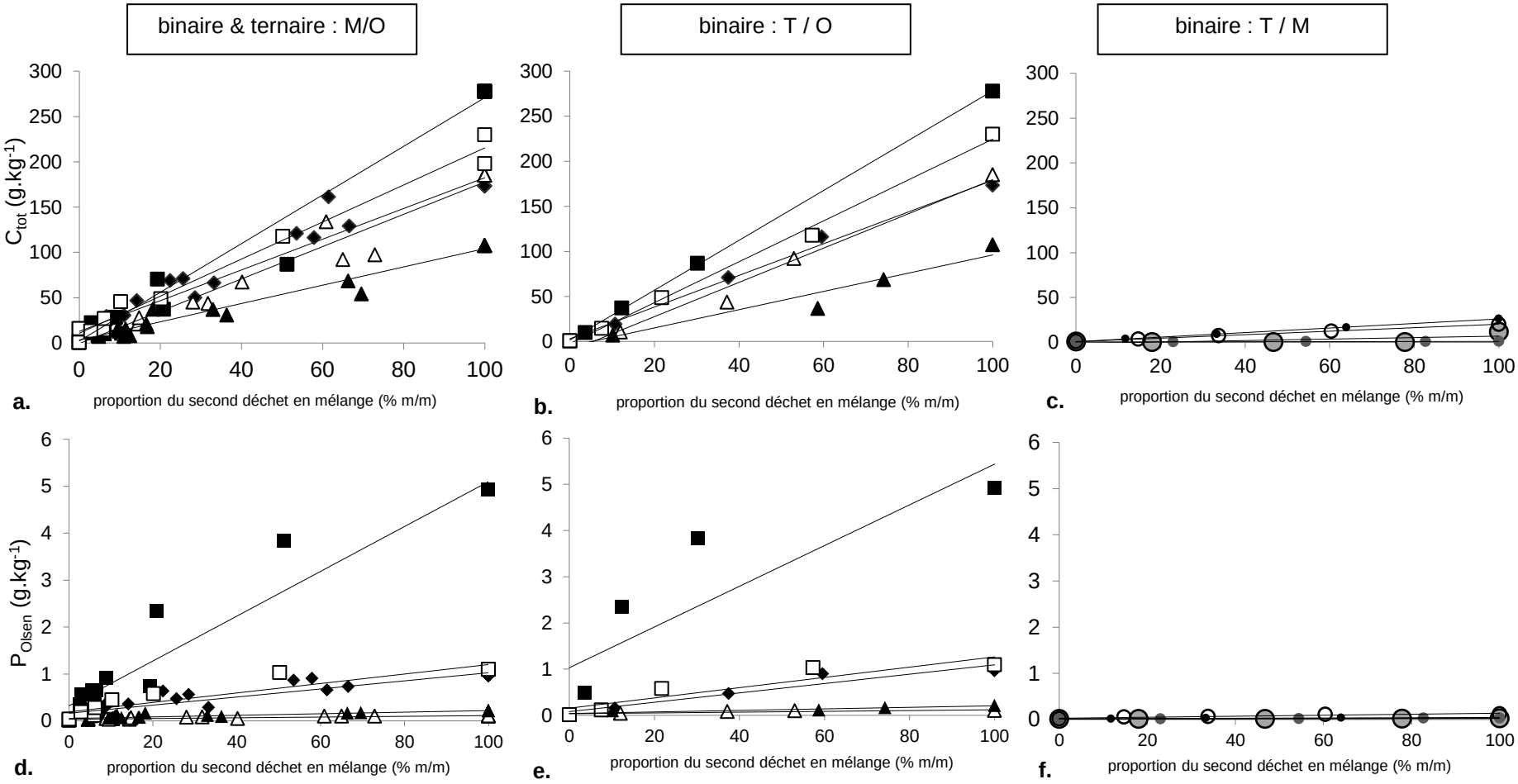
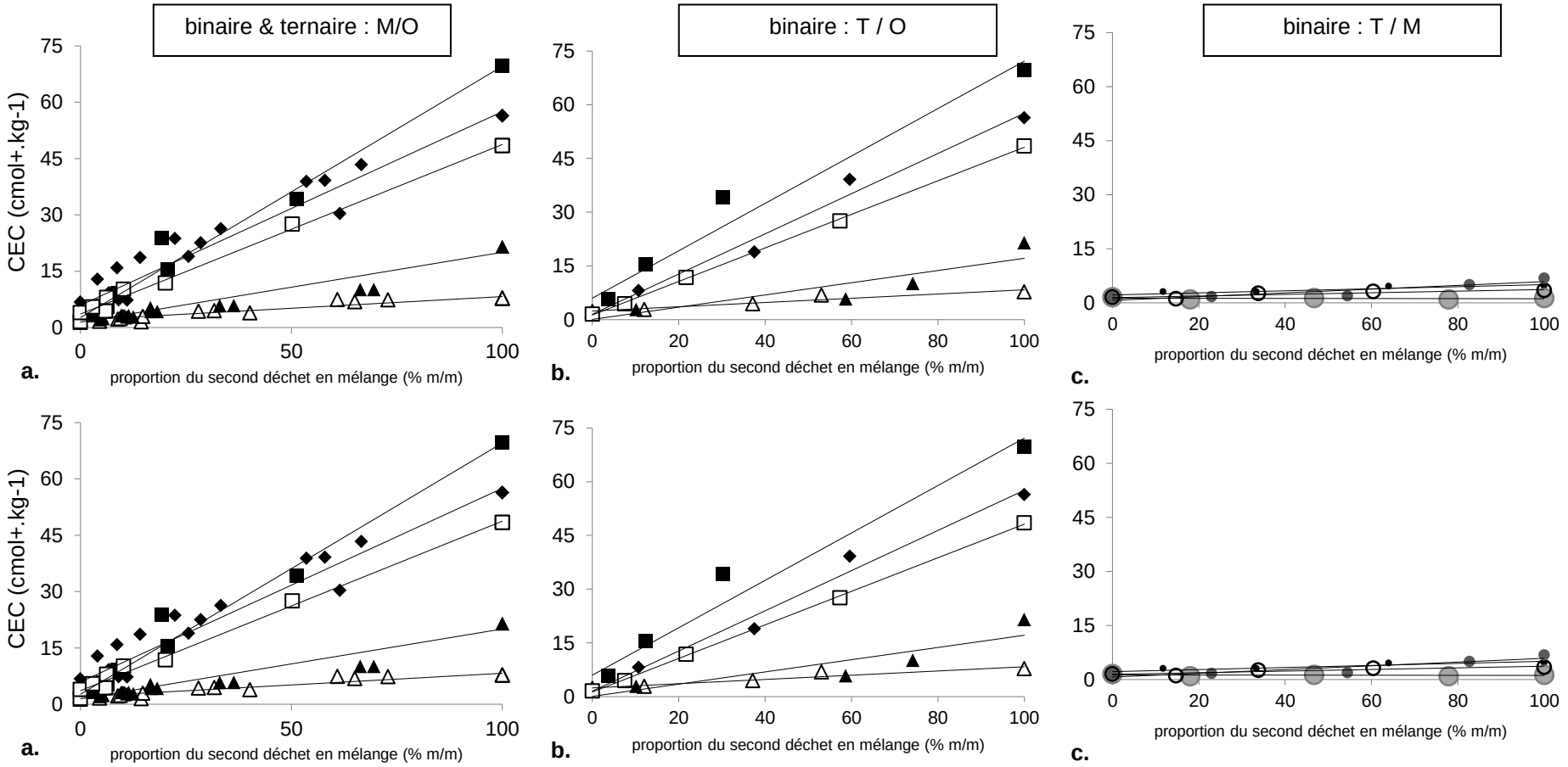


Figure 39 : Régressions linéaires doses-réponses pour Ctot (a, b et c) et pour POlsen (d, e, f), respectivement pour des mélanges binaires et ternaires de type « déchets minéral/déchets organique » (M/O) (a et d) ; des mélanges binaires de type « déchets terreux/déchets organiques » (T / O) (b et e) et des mélanges binaires de type « déchet terreux/déchets minéraux » (T/ M) (c et f)


binaire & ternaire : M/O
binaire : T / O
binaire : T / M
CEC (cmol+.kg-1)
proportion du second déchet en mélange (% m/m)
a.
b.
c.

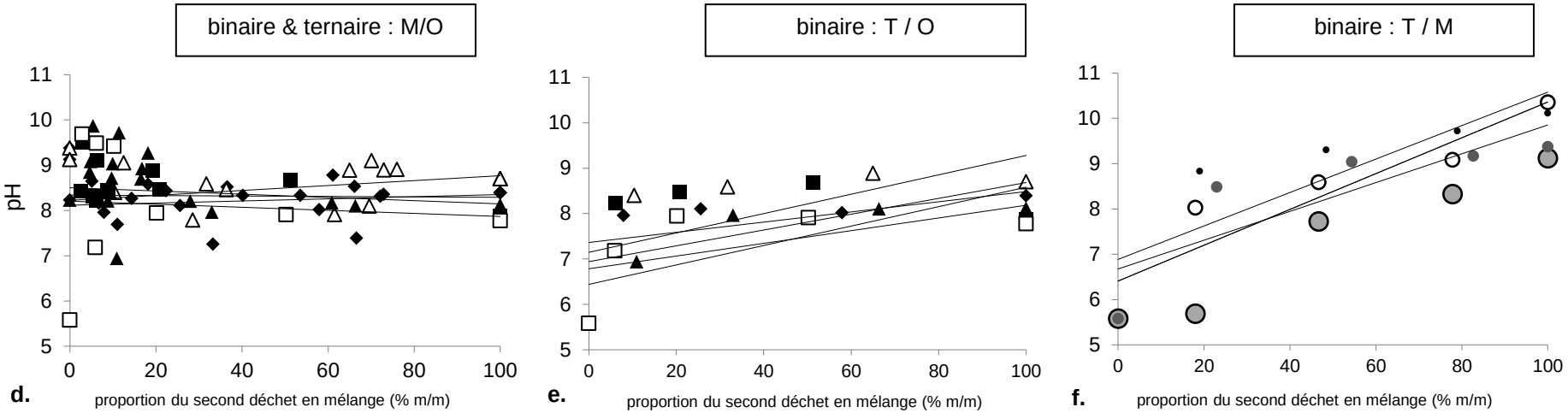


Figure 40 : Régressions linéaires doses-réponses pour la CEC (a, b et c) et pour le pH (d, e, f), respectivement pour des mélanges binaires et ternaires de type « déchets minéral/déchets organique » (M/O) (a et d) ; des mélanges binaires de type « déchets terreux/déchets organiques » (T / O) (b et e) et des mélanges binaires de type « déchet terreux/déchets minéraux » (T/ M) (c et f)

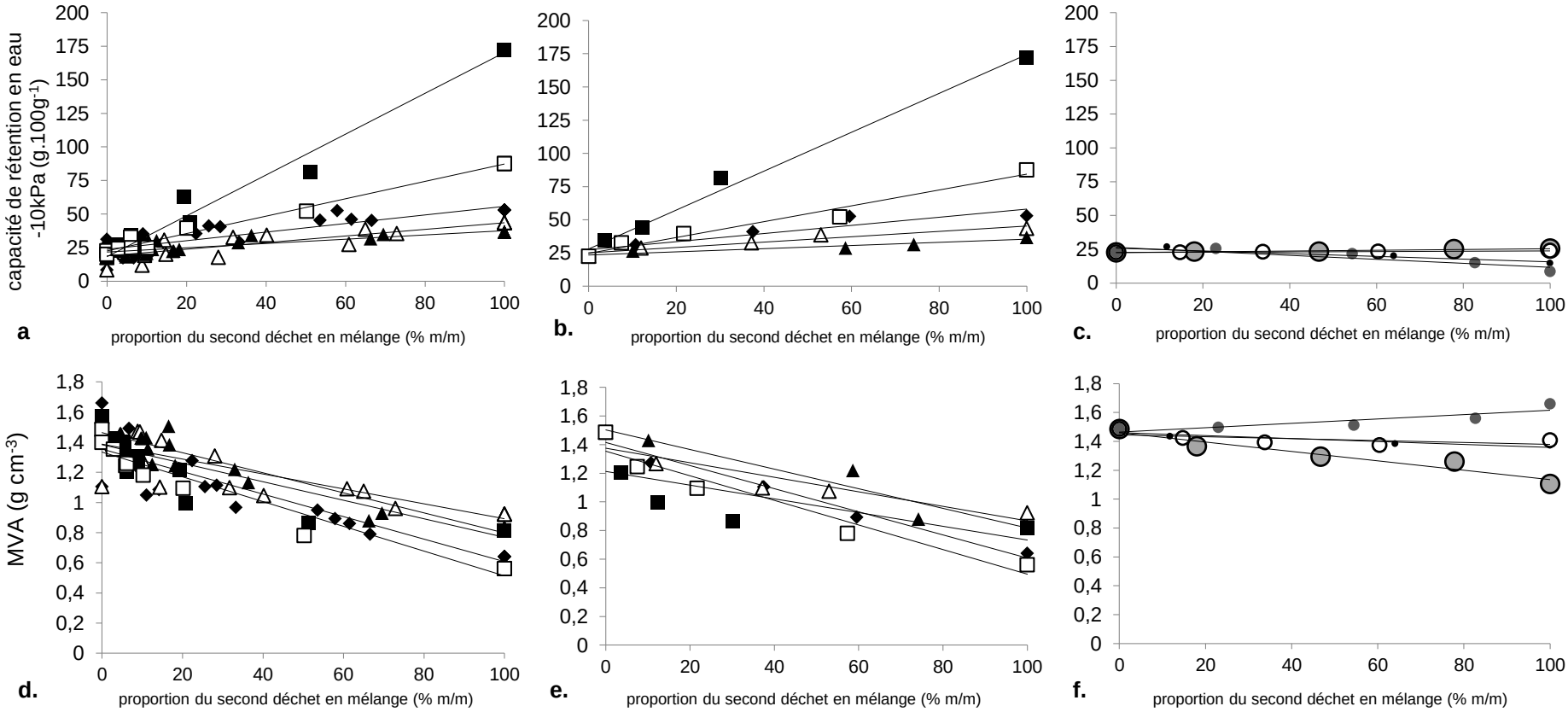


Figure 41 : Régressions linéaires doses-réponses pour la capacité de rétention en eau à -10 kPa (TE) (a, b et c) et pour la masse volumique apparente (MVA) (d, e, f), respectivement pour des mélanges binaires et ternaires de type « déchets minéral/déchets organique » (M/O) (a et d) ; des mélanges binaires de type « déchets terreux/déchets organiques » (T / O) (b et e) et des mélanges binaires de type « déchet terreux/déchets minéraux » (T/ M) (c et f)

IV.2.c. Modélisation des propriétés des mélanges

Les modèles

Ainsi, les caractéristiques initiales des matériaux parents ont été utilisées pour estimer les propriétés des mélanges de matériaux à différents ratios.
Le modèle de type « bilan » testé permet de prédire de façon assez précise (R^2=0,97) la masse volumique apparente. L'équation du modèle utilisée est la suivante :

$$MVA = \frac{1}{\sum_i \left[\frac{x_{M,i}}{\rho_{i,pur}}\right]}$$

Avec MVA correspondant à la masse volumique apparente du mélange, $x_{M,i}$ correspondant aux titres massiques de chaque matériau en mélange et $\rho_{i,pur}$ correspondant à la masse volumique apparente des matériaux utilisés dans le mélange. Les coefficients pour chacun des matériaux utilisés dans cette équation sont présentés sur le Tableau 36.

Tableau 37 : Coefficients utilisés pour la modélisation de la masse volumique apparent (MVA) des mélanges, pour chaque matériau CO, BE, BS, DV, SP, DR, TA, TB, DB, BR et BA

Titres associés	Coefficients	MVA
x_{CO}	a_1	0,57
x_{BE}	a_2	1,37
x_{BS}	a_3	0,69
x_{DV}	a_4	0,47
x_{SP}	a_5	0,90
x_{DR}	a_6	0,78
x_{TA}	a_7	1,35
x_{TB}	a_8	1,35
x_{DB}	a_9	1,33
x_{BR}	a_{10}	1,14
x_{BA}	a_{11}	1,51

Les modèles polynomiaux permettent une bonne prédiction des autres paramètres avec des R^2 variant de 0,86 à 0,99 (C_{tot} 0,90 ; P_{Olsen} 0,97 ; CEC 0,99 ; pH 0,86 et capacité de rétention en eau 0,99). Les modèles reproduisent une grande diversité de données expérimentales obtenues sur un large panel de mélanges de matériaux (données d'entrée : 516) et ce, avec une bonne qualité de représentation.

La validation du modèle

Afin de valider les modèles, nous avons essayé de tester la capacité du modèle à être transposé aux mêmes types de matériaux mais présentant des propriétés initiales différentes. Les matériaux de nature organique sont les plus sensibles aux variations de leurs propriétés en raison de leurs composants végétaux qui présentent un caractère saisonnier. Ainsi, la capacité de transposition du modèle a été testée sur 4 matériaux (CO_b, BS_b, DV_b et DR_b) issus d'un nouvel approvisionnement. La série de données ainsi obtenue avec les nouvelles données d'entrée (caractéristiques initiales des matériaux) a été comparée avec les résultats expérimentaux obtenus pour 12 mélanges. Les régressions obtenues montrent 2 « outliers » (valeurs anormales) : les mélanges TB/BA/BS et BE/DR/BR. Après suppression de ces derniers, les coefficients de corrélations sont davantage satisfaisants pour la plupart des paramètres testés (Figure 42). On peut distinguer 3 niveaux de capacité de prédiction : (i) les modèles développés pour la masse volumique apparente et la capacité de rétention en eau sont validés (R^2 de 0,95 et 0,93 respectivement) ; (ii) les modèles pour P_{Olsen} et la CEC présentent une capacité de prédiction intermédiaire (R^2 de 0,72 et 0,88) ; (iii) les modèles pour C_{tot} et pH ne sont pas validés ($R^2 \leq 0,6$). Les déviations observées peuvent être expliquées par la faible taille de la nouvelle série d'échantillons testés pour cette étape de validation (données d'entrées = 10) comparés à la grande taille de la série d'échantillons utilisée pour le développement des modèles.

Bilan

A l'issue de cette partie, les résultats montrent que les propriétés physico-chimiques des mélanges (75) testés en laboratoire peuvent être modélisées à l'aide d'équations mathématiques. Les coefficients de corrélation obtenus montrent une correspondance entre les valeurs modélisées et celles mesurées en laboratoire de précision décroissante pour la capacité de rétention en eau=CEC>P_{Olsen}=MVA> C_{tot}> pH. La phase de validation qui a été réalisée révèle que la généralisation des modèles obtenus est à modérer. Une généralisation semble néanmoins possible pour au moins 4 paramètres (MVA, capacité de rétention en eau, P_{Olsen}, CEC). Une augmentation du nombre de mélanges testés permettrait d'affiner ces modèles.

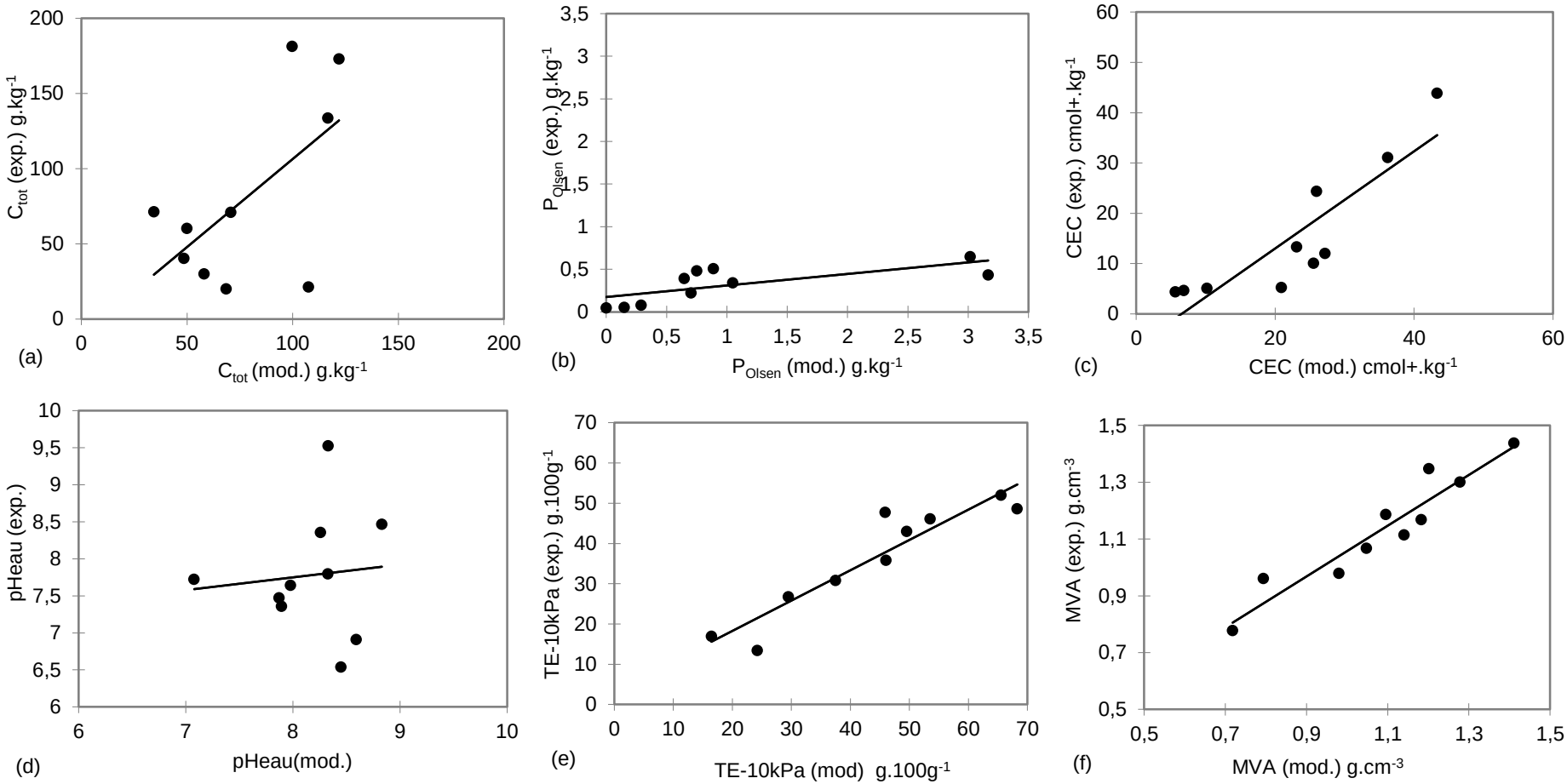


Figure 42 : Régressions linéaires correspondant à l'étape de validation : comparaison entre les valeurs modélisées (mod.) et les valeurs obtenues au laboratoire (exp.) pour les paramètres Ctot (a), POlsen (b) , CEC (c), pH (d), la teneur en eau à -10 kPa (e) et la masse volumique apparente (f), les coefficients de corrélation obtenus pour chaque paramètre Ctot, POlsen, CEC, pH, TE et MVA sont de respectivement 0,6 ; 0,72 ; 0,88 ; 0,1 ; 0,93 et 0,95

IV.3. Choix et réalisation des 6 mélanges modèles

L'objectif était ensuite de déterminer des mélanges modèles, correspondant aux trois types d'horizons évoqués précédemment afin de répondre aux deux usages modèles de sols d'espaces verts. En particulier, six mélanges (combinaisons de 2 ou 3 matériaux associés à différents ratios massiques) devaient être préparés pour être étudiés dans la suite du projet.

IV.3.a. Choix des mélanges modèles

Ce choix s'est fondé sur deux approches successives :

- La hiérarchisation, en fonction des objectifs de propriétés mécaniques, physiques, chimiques et biologiques à atteindre pour chaque horizon, d'un grand nombre de mélanges (749) dont les propriétés ont été prédites ou mesurées lors de l'étape décrite précédemment ;
- Un classement complémentaire, à dire d'experts, des mélanges par les partenaires du projet SITERRE.

Il a ainsi été possible de faire ressortir les mélanges répondant le mieux aux contraintes évoquées, et présentés dans le Tableau 37.

Tableau 38 : Mélanges modèles retenus pour la suite du projet

Horizon	Matériaux	% massiq M1	% massiq M2	% massiq M3	% volumiq M1	% volumiq M2	% volumiq M3
Témoin	TA/CO	75	25		50	50	
Croissance	BR/CO	50	50		33,33	66,66	
	BA/DR/CO	30	40	30	13	42	45
Technique	BA/SP	56	44		33,33	66,66	
Squelette	TA/BA/BS	21	74	5	20	60	20
	TA/BE/DV	34	63	3	30	60	10

IV.3.b. Réalisation des mélanges modèles

Matériaux

Une partie des matériaux utilisés pour réaliser les six mélanges sélectionnés pour la suite du projet Siterre, sont issus de la collecte de Mai 2011 - brique (BR), ballast (BA), béton (BE), sous-produits papetiers (SP) - et de Janvier 2012 - terre acide (TA). On note que les matériaux BR et BE avaient subi un broyage grossier en Juin 2011.
Les matériaux organiques, compost (CO), déchets de rue (DR), boues séchées (BS), déchets verts (DV), sont issus d'un réapprovisionnement récent par Durand TP (Août 2012), décidé suite à une dégradation naturelle des premiers lots.

Mélange

Les mélanges ont été réalisés sur la plateforme de Durand TP (Thorigné d'Anjou, 49) à l'aide d'un malaxeur de 500-600L de volume utile (Figure 43). Le malaxeur est posé sur un pèse-palette (Figure 44) permettant de suivre précisément les quantités introduites de chaque matériau.



Figure 43 : Vue extérieure et intérieure du malaxeur



Figure 44 : Vue du pèse palette et de la pelle mécanique

Mélange

Chaque matériau est mélangé à la pelle mécanique pour ré-homogénéiser l'andain (humidité), préalablement à son introduction dans le malaxeur. Chaque matériau est ensuite prélevé et déversé à la pelle dans le malaxeur (Figure 44). Les mélanges sont réalisés en ratio massique, par apport successif des matériaux dans le malaxeur. Chaque mélange de 2 ou 3 matériaux est ensuite malaxé pendant une durée de 3 minutes.
Les quantités de matériaux mises en œuvre pour les six mélanges sélectionnés pour caractérisation (sous-tâches 3-5 à 3-8) sont présentées dans le Tableau 37.

Clichés des mélanges modèles

Des images des différents mélanges sont présentées ci-dessous (Figure 45, Figure 46, Figure 47, Figure 48).



Figure 45 : Vue du mélange BA-DR-CO

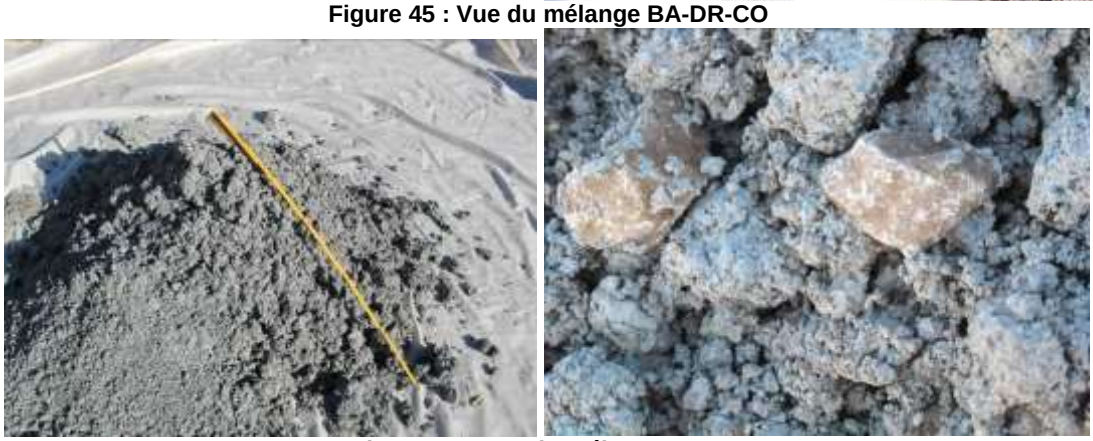


Figure 46 : Vue du mélange BA-SP



Figure 47 : Vue du mélange TA-BA-BS



Figure 48 : Vue du mélange TA-BE-DV

V. Caractérisation des 6 mélanges modèles de matériaux (=Tâche 3)

La caractérisation des mélanges a été opérée selon les mêmes protocoles de caractérisation que les matériaux individuels. S'il y a eu besoin ponctuel d'adaptation de méthodologie, le maximum de cohérence possible a été recherché entre caractérisation des mélanges et celle des matériaux individuels.

En parallèle de la présentation des résultats ci-après, la synthèse et le regroupement des résultats sous forme de tableau pour les différents mélanges modèles sont présentés en Annexe 6.

V.1. Caractérisation mécanique

Les essais réalisés doivent permettre d'apporter des informations sur les caractéristiques des mélanges (granulométrie, masse volumique des grains) et sur le comportement mécanique des mélanges après compactage (masse volumique sèche et teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal, Indice Portant Immédiat.

La particularité des matériaux étudiés (organique, minéral, déchet) a rendu difficile la mise en œuvre des différents essais prévus selon les normes en vigueur. Cela a amené à proposer certaines adaptations. Cependant, les mêmes procédures modifiées ont été appliquées à l'ensemble des mélanges étudiés.

Les mélanges ont été réalisés sur le site de Durand TP le 19 septembre 2012. Les prélèvements pour les essais ont été réalisés par quartage à la pelle. Environ 100 kg de chaque mélange ont été mis dans des sacs plastiques étanches pour être transportés à l'IFSTTAR de Nantes.

Ces mélanges pourraient être classés dans la catégorie des sols F (sols organiques, sous-produits industriels) au sens du Guide technique des terrassements routiers (GTR 2000), bien qu'il s'agisse en l'occurrence d'une nouvelle famille de matériau à la croisée des matériaux F1 (matériaux naturels renfermant des matières organiques) et F7 (matériaux de démolition).

V.1.a. Matériels et méthodes

Les normes d'essais qui ont été utilisées pour cette étude sont les suivantes :

– Propriétés géométriques
  • NF-EN933-1 : Mesure de la granulométrie

– Propriétés mécaniques et physiques
  • NF EN 1097-6 Annexe A et NF P 94-054 : Mesure de la masse volumique des grains
  • NF P 94-093 et NF-P 94-078 : Détermination de l'Optimum Proctor Normal et de l'Indice Portant Immédiat (IPI)

Les mélanges sont en sac d'environ 40 kg. Pour s'adapter à la particularité des mélanges, les méthodologies dérogent sur certains points stipulés dans les normes. La procédure de préparation pour les essais est réalisée en 6 étapes :

Etape 1. 2 à 3 sacs sont mélangés dans un bac, puis le mélange est quarté en 4 bacs.
Etape 2. Les bacs sont laissés à l'air libre pendant environ 1 semaine dans le laboratoire pour séchage partiel.
Etape 3. Chaque bac est transvasé dans un sac étanche et fait l'objet d'une mesure de teneur en eau.
Etape 4. Le contenu des bacs est quarté pour obtenir les masses d'échantillons nécessaires aux différents essais.

Etape 5. Les essais de granulométrie et de mesure de masse volumique sont réalisés.

- Essai granulométrique : L'échantillon est plongé pendant 1 heure dans l'eau puis lavé au tamis de 1 mm. Le tamisage de la fraction supérieure à 1 mm est réalisé à sec.
  Ecart par rapport à la norme : Le tamis pour la séparation des fines est de 1mm au lieu de 0.08 mm, pour tenir compte des difficultés à séparer les particules.

- Mesure de la masse volumique du tout-venant: Les mesures sont réalisées sur la fraction 0/40 mm avec des pycnomètres de 1000 ml, à l'eau distillée. (NF EN 1097-6 Annexe A)

- Mesure de la masse volumique des particules inférieures à 1 mm: Les mesures sont réalisées sur la fraction 0/1 mm avec des pycnomètres de 20 ml, à l'eau distillée (NF P 94-054)

Remarque : Deux normes d'essais ont été retenues pour la mesure de la masse volumique des grains en raison de la composition particulière des mélanges. En effet, pour l'essai 0/D, le dégazage n'est sans doute pas total (cas de boue par exemple), d'où des masses volumiques pouvant être surévaluées ; pour l'essai sur l'inférieur à 1 mm, la phase de séparation peut éliminer les composants organiques plus légers, d'où des masses volumiques pouvant être sous évaluées. Ceci explique le choix des deux méthodes pour estimer au mieux ce paramètre. Le tableau présente les valeurs retenues par la méthode la mieux adaptée selon la nature du matériau

Etape 6. Réalisation de l'essai Proctor Normal avec au moins 5 points de mesure.

- Essai proctor normal et IPI : Il s'agit de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau. Ces caractéristiques sont la teneur en eau massique optimale et la masse volumique sèche maximale.
  Pour les matériaux le nécessitant, un tamisage à 20 mm est réalisé soit avec un tamis (TA/BA/BS, TA/BE/DV, BA/DR/CO), soit à la main (BA/SP).
  Le matériau est normalement humidifié à plusieurs teneurs en eau (5 minimum) à la main. Il est ensuite compacté à l'aide d'une dame Proctor automatique. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe de variation de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.
  La mesure de l'Indice Portant Immédiat (IPI) consiste à mesurer la force à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau compacté. Elle est comparée à une force de référence pour deux enfoncements conventionnels. L'indice recherché est alors défini conventionnellement comme étant le plus grand des deux rapports ainsi calculés (exprimé en pourcentage).
  Ecart par rapport à la norme : La coupure à 20 mm peut être compliquée (problème pour séparer les particules)

V.1.b. Résultats des essais

Hormis le mélange BA/SP, les trois essais programmés (granulométrie, MV et proctor) ont pu être menés à bien en suivant une méthodologie adaptée. Pour le mélange BA/SP, la particularité du matériau n'a pas permis de réaliser dans de bonne condition l'analyse granulométrique et la mesure de la masse volumique, mais les essais Proctor ont par contre pu être réalisés.
Les résultats des essais de caractérisation sont regroupés dans le Tableau 38.

L'analyse des résultats de granulométrie (Figure 49) et des valeurs Proctor (Figure 50) met en évidence 3 grandes familles de mélange :

Famille 1. Les deux mélanges à 3 composants, TA/BA/BS et TA/BE/DV, comprenant la terre et des granulats plus gros (ballast ou béton), sont les plus grossiers, avec une proportion de fines (D<1 mm) inférieure à 30 % et 50 % des grains de diamètre supérieur à 12 mm. Ces deux mélanges se distiguent également au niveau de leur comportement au compactage, avec une teneur en eau à l'optimum inférieure à 15 % et des densités sèches les plus élevées, entre 1,7 et 1,9.

Famille 2. Les deux mélanges binaires, BA/SP et TA/CO, montrent une proportion de fines (D<1 mm) élevée, supérieure à 55 %, avec plus de 75 % des particules inférieures à 10 mm. Ce sont des mélanges absorbants, avec une teneur en eau à l'optimum autour de 20 %, pour une masse volumique sèche en baisse, entre 1,5 et 1,7 t/m^3.
Remarque : pour le mélange avec les boues de papéterie, la granulométrie n'a pas pu être réalisée compte tenu de la nature particulière des boues. Ce sont cependant des particules plutôt fines, et on a supposé que le mélange répondait aux mêmes conclusions que pour la Terre acide/Compost.

Famille 3. Les derniers mélanges, BA/DR/CO et BR/CO, se positionnent entre les familles 1 et 2, avec une proportion de fines entre 35 % et 45 % , et plus de 60 % des particules de diamètre inférieur à 10 mm. La répartition entre fins et gros éléments est plus homogène (courbe moins creuse). Ce sont les mélanges les plus difficiles à compacter. Les masses volumiques sèches sont faibles, inférieures à 1,2 t/m^3, pour des teneurs en eau à l'optimum plutôt élevées, supérieures à 35 %.

Tableau 39 : Résultats des essais mécaniques

	Granulométrie		**Masse volumique des grains* ρ_s (t/m^3)**		**Proctor** W_{opt}(%), ρ_{opt}(t/m^3)	**Indice IPI**	
	D50 (mm)	<1 mm (%)	<1 mm P94-054	0-40 mm EN1097-6		A l'optimum	w(%) à IPI=7
TA/CO	<1	57,8	2,69	-	w20,8 - d1,55	20,8	22,8
BR/CO	6,6	37,4	-	2,18	w37,9 - d1,12	18,0	43,5
TA/BA/BS	12,0	25,9	2,69	-	w12,9 - d1,89	13,2	14,5
TA/BE/DV	12,6	26,8	2,69	-	w11,8 - d1,76	27,5	>14
BA/SP	Non réalisable		-	2,64	w22,5 - d1,64	3,3	19,3
BA/DR/CO	2,19	43	2,27	-	w35,2 - d1,29	2,43	34,4

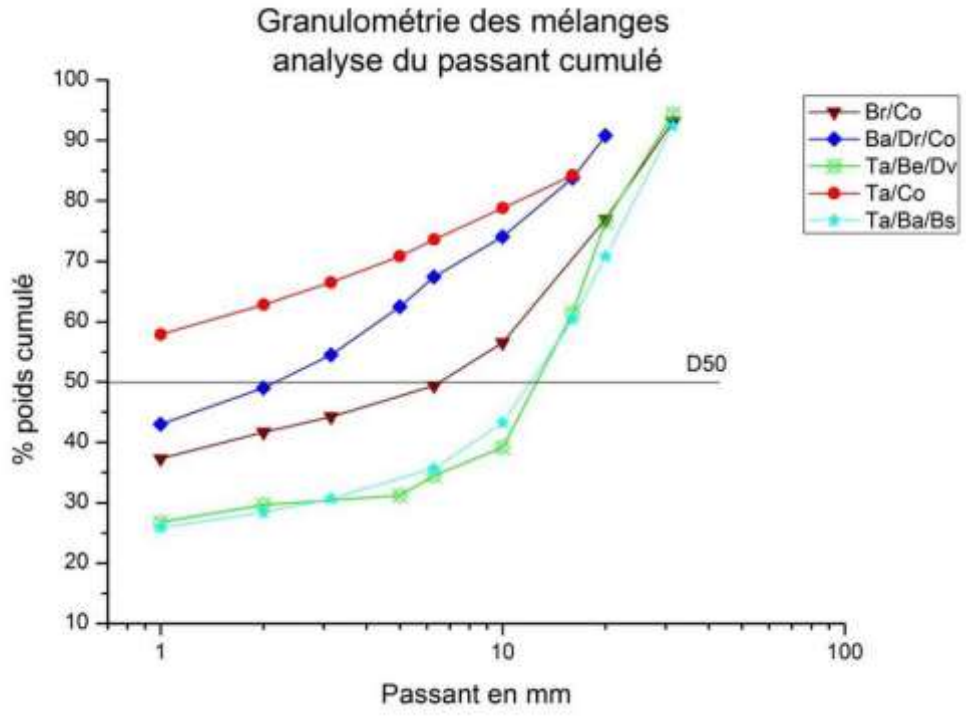


Figure 49 : Analyse granulométrique des mélanges (x5)

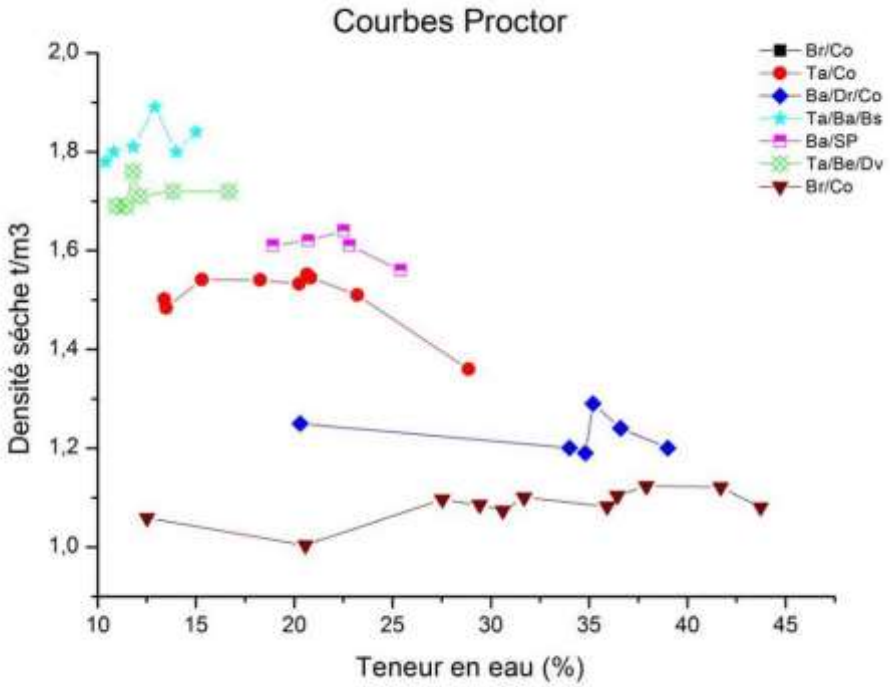


Figure 50 : Courbes Proctor des mélanges (x6)

La Figure 51 présente les résultats des essais proctor et IPI pour chaque mélange. Elle met en évidence les différences de comportement entre eux, notamment au niveau de l'indice portant immédiat (IPI). Cet indice est utilisé pour caractériser les sols lors des travaux routiers, il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier directement sur sa surface lors des travaux de terrassement.

- Le mélange TA/BA/BS n'est pas un matériau où l'optimum est simple à définir (courbe plate). Il s'agit cependant d'un matériau qui se compacte bien (masse volumique sèche autour de 1,89 t/m^3) pour des teneurs en eau autour de 13 %. La traficabilité (pour un IPI>7) est bonne autour de l'optimum, puis chute au-delà de 15 %.
- Le mélange TA/BE/DV est un matériau qui se compacte bien, avec une masse volumique sèche à l'optimum de 1,76 t/m^3, pour des teneurs en eau autour de 12 % ; même si l'optimum n'est pas si évident à définir (courbe plate). La traficabilité (pour un IPI>7) est bonne autour de l'optimum, avec une pente peu élevée au delà.

  A noter un écart minimum entre les deux méthodes de mesure de la masse volumique des grains, probablement lié à l'influence des matières organiques ; la valeur retenue est celle obtenue avec les particules <1mm.
- Le mélange TA/CO est un matériau présentant un comportement assez classique (de terrassement), où la détermination de l'optimum est simple, avec un optimum autour de 20 % et une masse volumique sèche encore élevée de 1,55 t/m^3.

  Les deux méthodes de mesure des masses volumiques montrent les difficultées liées à la présence des particules végétales du compost ; la valeur retenue est celle obtenue avec les particules <1mm.

  La mesure de l'IPI montre une forte chute de la portance au delà de l'optimum. C'est un bon matériau pour la traficabilité (IPI>7), même au-delà de l'optimum.
- Le mélange BA/SP présente une courbe proctor assez plate, rendant difficile la détermination de l'optimum. Ce matériau se compacte cependant assez bien, avec un optimum autour de 22 % pour la teneur en eau w_{opn}, et une masse volumique séche de 1,64 t/m^3. A l'instar de TA/CO, il se compacte bien, mais présente des IPI inférieurs à 7 à l'état humide (au-delà de wopn), ce qui indique un sol déformable sous trafic.

  La valeur de masse volumique retenue est celle obtenue avec les particules >1 mm. L'analyse des deux méthodes montrent que c'est le ballast qui influence le résultat, les boues étant plus légères.
- Le mélange BA/DR/CO nécessite beaucoup d'eau, autour de 35 % , pour obtenir finalement un compactage optimum assez faible avec une masse volumique sèche de 1,29 t/m^3 ; bien que la

détermination de cette optimum ne soit pas si nette. L'IPI chute fortement un peu avant cet optimum. Les IPI sont faibles avec un maximum à 8; c'est un matériau qui va poser des problèmes de traficabilité quelle que soit la teneur en eau.

L'écart entre les deux méthodes de mesure de la masse volumique est probablement lié à la présence des particules végétales; la valeur retenue est celle obtenue avec les particules <1mm.

- Le mélange BR/CO présente une courbe Proctor presque plate, pour des teneurs en eau à l'optimum autour de 37 %, et une masse volumique sèche faible de 1,12 t/m^3. Il est difficile de fixer un optimum dans ces conditions. Par contre, les IPI sont élevés autour de l'optimum avec des valeurs supérieures à 10.

  Les deux méthodes de mesure des masses volumiques montrent les difficultées liées à la présence des particules végétales du compost ; la valeur retenue est celle obtenue avec les particules >1 mm.

Ces résultats mettent en évidence trois familles de mélanges qui se distinguent par leur comportement en présence d'eau :

- Les mélanges TA/BA/BS et TA/BE/DV sont les matériaux présentant les meilleurs taux de compactage, avec une masse volumique sèche à l'optimum entre 1,7 et 1,8 t/m^3, pour des teneurs en eau à l'optimum autour de 12 %. Ils se caractérisent par une faible proportion de fines autour de 26 % (D<1 mm) et des masses volumiques des grains équivalents à un matériau naturel (*ρs = 2,69 t/m^3). Leur squelette (taux fines inférieur à 35 %) est plus « charpenté » que celui des mélanges suivants.*
- Les mélanges BA/SP et TA/CO présentent une teneur en eau à l'optimum supérieure, autour de 20 % pour une masse volumique sèche plus faible autour de 1,6 t/m^3. Ce sont aussi des matériaux avec un peu plus de fines, autour de 57 % et une masse volumique des grains également autour de 2,69 t/m^3.
- Les mélanges BA/DR/CO et BR/CO sont des matériaux nécessitant jusqu'à 35 % d'eau pour un compactage optimum, pour une masse volumique sèche faible d'environ 1,2 t/m^3. Ce sont aussi les mélanges présentant un taux de fines supérieur à 37 % et les masses volumiques de grains les plus faibles, inférieures à 2,3 t/m^3.

Des grilles d'évaluation multi-critères ont été établies pour comparer les différents matériaux de base pour la constitution des mélanges. Le Tableau 39 résume les correspondances avec les indices retenus pour les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux :

Tableau 40 : Indices d'évaluation des proriétés physiques et mécaniques des matériaux

Eléments grossiers % masse >50mm	Indice	Terre fine % masse <2mm	Indice	IPI	Indice
>80%	3	>80%	3	>10 sol non déformable	3
60 à 80 %	2	60 à 80 %	2	6 à 10 sol peu déformable	2
40 à 60 %	1	40 à 60 %	1	3 à 6 sol déformable	1
<40 %	0	<40 %	0	<3 sol très déformable	0

Pour un horizon squelette on recherche un mélange structurant et il faut la présence d'éléments grossiers > 50mm. Néanmoins dans ce mélange une proportion de matériaux grossiers comprise entre 60 et 80 % serait souhaitable et les indices retenus pour les matériaux constituant le mélange ne sont plus utilisables. Pour un horizon de plantation on recherche un matériau riche en terre fine < 2mm.

Le Tableau 40 présente l'évaluation des différents mélanges :

Tableau 41 : Evaluation des mélanges testés

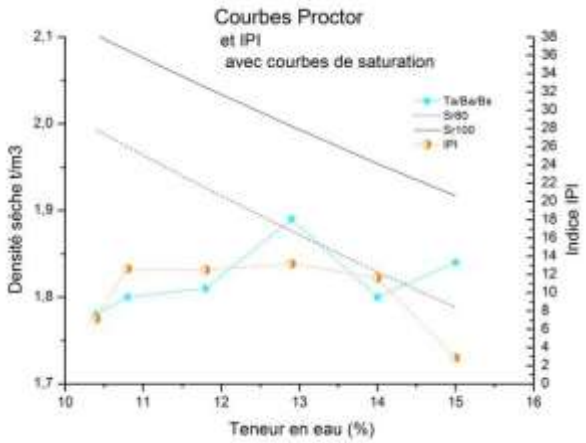
Paramètre	Témoin	Horizon de croissance		Horizon technique	Horizon squelette	
	TA/CO	BA/DR/CO	BR/CO	BA/SP	TA/BA/BS	TA/BE/DV
<2mm	2	1	1	Non déterminé	0	0
>50mm	-	-	-	-	-	-
IPI	3	0	3	1	3	3

Les échantillons testés ne contenaient pas de matériaux de taille supérieure à 50 mm. La terre fine est présente dans le témoin et les mélanges constitués pour les horizon de croissance mais en faible proportion.

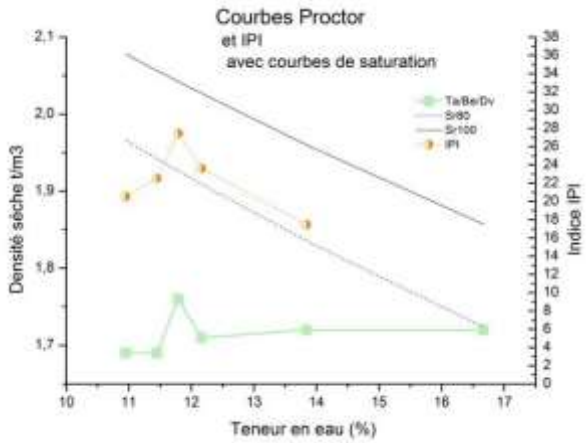
Du point de vue de la traficabilité immédiate, seuls deux mélanges, le BA/SP et le BA/DR/CO, pourront poser des problèmes avec des IPI à l'optimum très largement inférieurs à 6. Les autres mélanges présentent des caractérisiques de sols non déformables, en particulier les 2 horizons squelettes.

Attention toutefois aux limites suivantes de la présente étude :

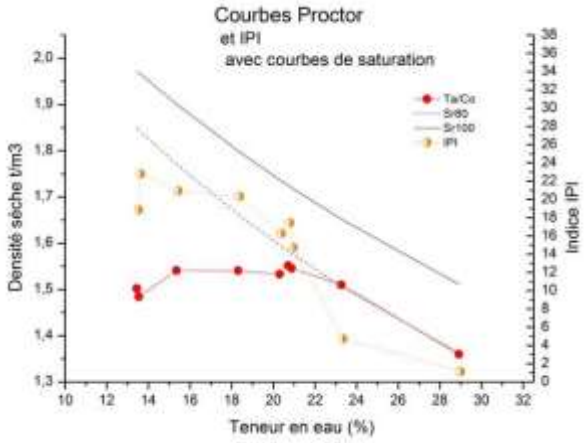
- hormis le mélange Terre/Compost, l'optimum Proctor des cinq autres mélanges reste difficile à fixer au vu des courbes de compactage très plates ; il est succeptible de varier en fonction de la répartition dans l'échantillon des composants primaires. Pour réduire ce biais, Nous avons homogénéisé le mélange par le quartage.
- la composition des mélanges a rendu difficile la mesure de la masse volumique des grains. Nous avons eu recours à deux méthodes pour estimer ce paramètre.
- l'étude n'a pas abordé le comportement à long terme des matériaux évolutifs, comme le gonflement ou le tassement éventuel des mélanges à composantes organiques.



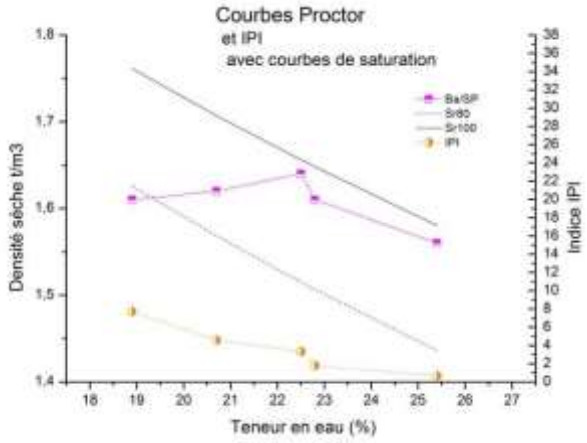
TA/BA/BS (ρs 2,69)



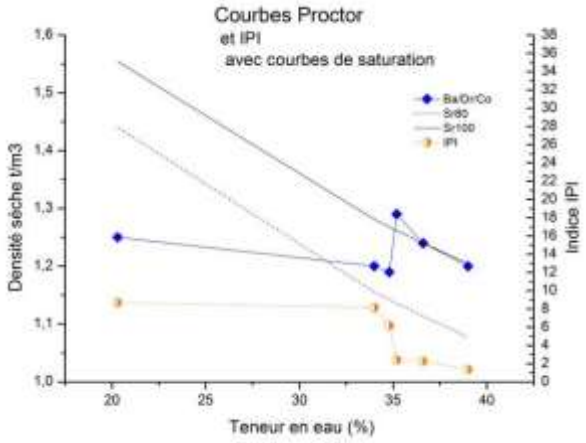
TA/BE/DV (ρs 2,69)



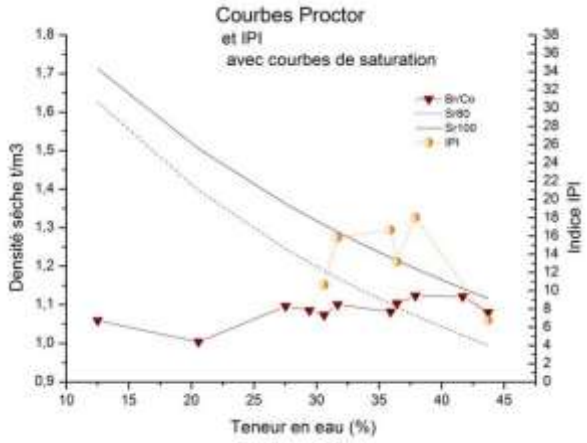
TA/CO (ρs 2,69)



BA/SP (ρs 2,64)



BA/DR/CO (ρs 2,27)



BR/CO (ρs 2,18)

Figure 51 : Détail des courbes Proctor et IPI (*ρ : masse volumique des grains)*

V.2. Caractérisation chimique et calculs géochimiques

V.2.a. Analyses totales

Eléments majeurs

Les analyses ont été réalisées sur la fraction inférieure à 2 mm des échantillons. Les résultats des analyses sont présentés dans le Tableau 41.

TA/CO
La teneur en matières organiques est assez élevée, 12,3 %. Les constituants majeurs du mélange sont le silicium (60 % en SiO_2), l'aluminium (14,7 % en Al_2O_3), le fer (3,9 % en Fe_2O_3) et le potassium (3,1 % en K_2O). Les teneurs en calcium et potassium, exprimées en CaO et K_2O, sont de l'ordre de 1 %.

La comparaison avec les teneurs théoriques d'un mélange 75/25 % en masse de terre acide et de compost montre que cette proportion est bien respectée dans la fraction inférieure à 2 mm.

BR/CO
Le mélange se caractérise par une teneur en matières organiques très élevée, 36,8 %. Le silicium représente 35,2 % en SiO_2, l'aluminium 7,4 % en Al_2O_3, le fer 6,5 % en Fe_2O_3, le calcium 4,7 % en CaO , le phosphore 3,3 % en P_2O_5 et le potassium 2,1 % en K_2O.

La fraction inférieure à 2 mm du mélange est très enrichie en compost du fait de la granulométrie grossière des déchets de briques. Sur la base de la teneur en matières organiques, essentiellement présentes dans le compost, cette fraction contiendrait environ 88 % de compost et 12 % de brique, au lieu de 50/50 % dans le mélange brut.

BA/DR/CO
La teneur en matières organiques est élevée, 27 %, le mélange contient également du silicium (46,6 % en SiO_2), de l'aluminium (7,4 % en Al_2O_3), du fer (6 % en Fe_2O_3), du calcium (4,6% en CaO), et du sodium (2,7 % en Na_2O).

La teneur en matières organiques est élevée par rapport à la teneur théorique du mélange (18 %) ce qui correspond certainement à un enrichissement de la fraction inférieure à 2 mm en matériaux fins organiques, notamment du compost.

BA/SP
La teneur en matières organiques est de 12,9 %. La teneur en calcium est importante, 33 % en CaO. La teneur en silicium s'élève à 20,4 % en SiO_2, celle en aluminium à 7,7 % en Al_2O_3, celle en fer à 3,8 % en Fe_2O_3 et celle en magnésium à 2 % en MgO.

La fraction inférieure à 2 mm de ce mélange est également enrichie en sous-produits papetiers du fait de la différence de granulométrie avec le ballast. Sur la base de la teneur en fer, élément principalement apporté par le ballast, la composition de cette fraction serait de 27 % de ballast (au lieu de 56 %) et 73 % de sous-produits papetiers.

Tableau 42 : Eléments majeurs (mg/kg) et matières volatiles à 450°C (% masse). Résultats pour la fraction inférieure à 2 mm

Paramètres	TA/CO	BR/CO	BA/DR/CO	BA/SP	TA/BA/BS	TA/BE/DV
MV (%)	12,3	36,8	27	12,9	7,8	4,8
Si	279815	164457	217358	95415	258990	314026
Al	77850	39422	39395	40870	84024	91624
Fe	27262	45620	42053	26726	58605	20659
Mn	175	570	586	359	633	83
Mg	2359	5150	8860	12147	14812	2123
Ca	8027	33775	33168	234875	27913	10583
Na	2472	5161	9884	4665	9078	1862
P	4308	14348	7768	662	3767	423
K	26158	17758	13268	2833	18137	27388

TA/BA/BS
La teneur en matières organiques est plus faible dans ce mélange, 7,8 %. La teneur en silicium s'élève à 55,5 % en SiO_2, celle en aluminium à 15,9 % en Al_2O_3, celle en fer à 8,4 % en Fe_2O_3 et celle en calcium à 3,9 % en CaO. Les teneurs en magnésium, sodium et potassium sont comprises entre 2,5 et 2,2 % (en MgO, Na_2O et K_2O).

La fraction inférieure à 2 mm du mélange est également enrichie en matériaux fins, terre acide et boues de station d'épuration. Si on considère que la matière organique est apportée par la boue et le manganèse par le ballast, la composition du mélange serait 46/42/12 % au lieu de 21/74/5 % dans le mélange brut.

TA/BE/DV
La teneur en matières organiques est la plus faible de tous les mélanges, 4,8 %. La teneur en silicium est élevée, 67,3 % en SiO_2, de même que la teneur en aluminium, 17,3 % en Al_2O_3. Le mélange contient également du potassium (3,3 % en K_2O), du fer (2,9 % en Fe_2O_3) et du calcium (1,5 % en CaO).

D'après la teneur en matières organiques, principalement apportée par les déchets verts, et celle en calcium qui provient du béton et des déchets verts, on peut estimer la composition du mélange qui contiendrait 77 % de terre acide, 13 % de béton et 10 % de déchets verts, au lieu de respectivement 34, 63 et 3 %.

Eléments traces

Les concentrations en éléments traces (Tableau 42) sont généralement peu élevées dans les mélanges testés. Ces concentrations sont notamment inférieures aux teneurs limites fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998 pour les sols recevant des épandages de boues de station d'épuration, ainsi que les valeurs limites fixées pour les supports de cultures par la norme NF U44-551, en ce qui concerne Pb, Zn, Cd, Cr, Cu et Ni. On note cependant que les concentrations en zinc (319 mg/kg) et cuivre (134 mg/kg) dépassent légèrement ces seuils (respectivement 300 et 100 mg/kg) dans le mélange brique/compost. La concentration en arsenic est également élevée dans ce mélange (25 mg/kg). Les concentrations en zinc (257 mg/kg) et cuivre (124 mg/kg) sont également importantes dans le mélange BA/DR/CO. Les polluants sont apportés notamment par le compost (Zn et Cu) et pour l'arsenic, par le compost et les déchets de brique. Les concentrations sont toutes inférieures aux seuils d'intervention fixés par la norme hollandaise pour les sols pollués.
Bien que les produits pris en compte dans cette étude soient en dehors du domaine d'application de ces réglementations, la comparaison avec ces valeurs limites permet de mieux évaluer les niveaux de pollution des matériaux testés.

Tableau 43 : Eléments traces (mg/kg). Résultats des analyses de la fraction inférieure à 2 mm

Paramètres (mg/kg)	TA/CO	BR/CO	BA/DR/CO	BA/SP	TA/BA/BS	TA/BE/DV	Arrêté du 8/01/98 et NF-U44-551	Pays-Bas
Sb	3,9	7	15	2,5	4,2	2,1	-	-
Ba	475	327	288	70	339	503	-	200-625
Mo	1,4	4,2	3,7	1,6	2,3	0,9	-	10-200
Se	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-	-
Pb	24	46	40	17	18	20	100	85-530
Zn	112	319	257	54	119	59	300	140-720
Cr	48	40	56	40	79	40	150	100-380
Cu	44	134	124	77	63	35	100	36-190
Cd	0,2	0,5	0,3	0,2	0,2	<0,1	2	0,8-12
As	15	25	15	4	15	12	-	29-55
Ni	17	19	24	16	26	18	50	35-210

V.2.b. Tests de lixiviation

Les essais ont été réalisés sur la fraction inférieure à 4 mm. Les résultats sont présentés dans le Tableau 43. Sur ce tableau les teneurs mesurées sont comparées aux valeurs limites fixées par l'arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage des déchets inertes et par le guide sur l'acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière du SETRA. Ces valeurs sont données à titre de repères pour situer le niveau du potentiel polluant des mélanges testés dans le projet, ces mélanges de matériaux étant en dehors du champ d'application de ces textes réglementaires.

TA/CO
Le pH des lixiviats est de 7,7 et la fraction soluble est assez importante, 9890 mg/kg. La fraction soluble provient essentiellement du compost, il apporte également du potassium (1055 mg/kg), des sulfates (1062 mg/kg) et du COT (1700 mg/kg) dans les lixiviats. La concentration en arsenic (0,6 mg/kg), légèrement supérieure au seuil des déchets inertes (0,5 mg/kg), peut également être attribuée à la présence du compost.

BR/CO
Ce mélange se caractérise par un pH de 7,8 et une fraction soluble importante, 13880 mg/kg, apportée par les 2 constituants. Le calcium (1389 mg/kg), le soufre (2324 mg/kg) et les sulfates (6587 mg/kg) sont liés à la présence des déchets de briques. Le potassium (3439 mg/kg) les chlorures (1470 mg/kg) et le COT (4240 mg/kg) sont principalement liés à la présence du compost. On note également la présence d'arsenic dans les lixiviats (0,7 mg/kg), élément relargué par les 2 constituants.

BA/DR/CO
Le pH des lixiviats est relativement basique, de l'ordre de 8,0, et la fraction soluble est très importante, 25110 mg/kg. Le compost est responsable de la présence dans les lixiviats de potassium (1923 mg/kg), de chlorures (1053 mg/kg), de sulfates (1900 mg/kg) et de COT (2440 mg/kg). On peut noter que les éléments traces sont très peu relargués par ce mélange.

BA/SP
Les lixiviats sont assez basiques, 8,1, est la fraction soluble est la plus faible de tous les mélanges testés, 3070 mg/kg. Les sous-produits de papeterie entraînent la présence de faibles quantités de calcium (704 mg/kg) et de COT (547 mg/kg). Les éléments traces sont également peu présents dans les lixiviats.

TA/BA/BS
Le pH des lixiviats est de 7,9, la fraction soluble est peu importante, 4650 mg/kg. Les boues de station d'épuration apportent principalement cette fraction soluble (notamment du calcium et du potassium) ainsi que du COT (2160 mg/kg) et elles sont également responsables de la valeur élevée relevée pour l'indice phénol (19 mg/kg). Les éléments traces sont peu présents dans les lixiviats.

TA/BE/DV
Le pH des lixiviats est basique, 8,1, et la fraction soluble est faible, 3420 mg/kg. La fraction soluble est liée à la présence des déchets verts, qui explique également la présence du potassium (406 mg/kg), ainsi que celle du béton qui est liée au relargage du calcium (536 mg/kg). Les déchets verts sont également responsables de la concentration élevée en COT (2160 mg/kg), tandis que le béton est responsable de la présence des sulfates (786 mg/kg). Les éléments traces sont également très peu relargués dans ce mélange.

Tableau 44 : Synthèse des résultats du test de lixiviation

Paramètres (mg/kg)	TA/CO	BR/CO	BA/DR/CO	BA/SP	TA/BA/BS	TA/BE/DV	Déchets inertes	SETRA
pH	7,7	7,8	8,0	8,1	7,9	8,1	-	-
Conductivité (µS/cm)	958	2822	1476	315	800	465	-	-
Fraction soluble	9890	13880	25110	3070	4650	3420	4000	60000
Cl^-	485	1470	1053	70	173	101	800	15000
F^-	2,5	4,1	1,75	0,7	78	2,5	10	150
SO_4^{2-}	1062	6587	1900	189	422	786	1000	20000
NO_3^-	524	942	1515	264	25	4,6	-	-
NO_2^-	657	1763	0,5	3	0,3	0,2	-	-
PO_4^{3-}	81	104	105	3,9	37	13	-	-
COT	1700	4240	2440	547	2160	714	500	-
HcT	<1	<1	1,2	<1	<1	<1	-	-
I-Phénol	0,23	0,20	0,13	<0,10	19	<0,10	1	-

En conclusion, le pH des lixiviats mesuré pour les différents mélanges est relativement basique, compris entre 7,7 et 8,1, et la fraction soluble est importante pour les 3 mélanges contenant du compost (TA/CO, BR/CO et BA/DR/CO). La teneur en potassium et en COT des lixiviats est également élevée pour ces trois mélanges du fait de la présence du compost. Les déchets de briques sont responsables d'une concentration importante en sulfates dans les lixiviats du mélange BR/CO.

Tableau 45 : Synthèse des résultats du test de lixiviation (éléments traces)

Paramètres (mg/kg)	TA/CO	BR/CO	BA/DR/CO	BA/SP	TA/BA/BS	TA/BE/DV	Déchets inertes	SETRA
Ba	0,8	0,6	0,5	0,2	<0,05	0,2	20	100
Mo	0,36	1,4	0,40	0,07	0,25	0,04	0,5	10
Pb	0,2	0,2	0,2	<0,05	<0,05	<0,05	0,5	10
Zn	1,5	2,2	1,7	0,1	0,1	0,05	4	50
Cr	0,6	0,1	0,1	<0,05	<0,05	<0,05	0,5	10
Cu	0,8	1,1	0,9	0,4	0,3	0,1	2	50
Cd	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,04	1
As	0,6	0,7	0,4	<0,05	0,3	0,1	0,5	2
Ni	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	<0,05	0,4	10

Les concentrations en éléments traces sont généralement peu élevées dans les lixiviats (Tableau 44). Ces concentrations sont inférieures ou très proches (cas de Cr pour le mélange TA/CO et de As pour les mélanges TA/CO et BR/CO) des valeurs limites fixées pour les déchets inertes. Toutes les valeurs sont inférieures aux seuils fixés pour les matériaux alternatifs en construction routière fixés par le guide du SETRA.

Du point de vue environnemental, seul le mélange BR/CO semble « problématique » du fait de dépassement de seuils pour les teneurs totales en Cu et Zn, ainsi qu'une teneur élevée en As, et du relargage de sulfates dans les lixiviats.

V.2.c. Essai de percolation en colonne ascendante

Echantillons testés

Les sols techniques retenus pour subir la percolation sont constitués à partir de neuf déchets listés et référencés dans le tableau ci-dessous. Les mélanges testés sont réalisés sur la plateforme PROVADEMSE en fonction des pourcentages massiques donnés ci-dessous. Les éléments supérieurs à 10 mm sont concassés et remis dans l'échantillon correspondant.

Tableau 46 : Déchets et références

Déchets	Référence
Ecarts de fabrication de briques	BR
Béton concassé	BE
Ballasts usagés de chemins de fer	BA
Terres de déblais excavées non contaminées acides	TA
Déchets verts broyés	DV
Déchets de balayage de rues	DR
Boues papetières	SP
Boues de stations d'épuration	BS
Compost de déchets verts et boues de STEP	CO

Tableau 47 : Composition des sols artificiels soumis à la percolation

	Référence du sol	Composition du sol (% massique)
1	TA/CO	75% de « Terres de déblais excavées non contaminées acides » & 25% de « Compost de déchets verts et boues de STEP »
2	BR/CO	50% de « Ecarts de fabrication de briques » & 50% de « Compost de déchets verts et boues de STEP »
3	BA/DR/CO	30% de « Ballasts usagés de chemins de fer » & 40% de « Déchets de balayage de rues » & 30% de « Compost de déchets verts et boues de STEP »
4	BA/SP	56% de « Ballasts usagés de chemins de fer » & 44% de « Boues papetières »
5	TA/BA/BS	21% de « Terres de déblais excavées non contaminées acides » & 74% de « Ballasts usagés de chemins de fer » & 5% de « Boues de stations d'épuration »
6	TA/BE/DV	34% de « Terres de déblais excavées non contaminées acides » & 63% de « Béton concassé » & 3% de « Déchets verts broyés »

On notera que sur les six sols reconstitués, nous avons trois sols de composition binaire et trois sols de composition ternaire

Objectifs de l'essai de percolation standard

La norme TS 14 405 a deux objectifs :

- L'un est la détermination de l'allure du relargage ce qui permet une exploitation quant à son évolution en terme du maintien du niveau de relargage ou de ralentissement voire d'épuisement.
- L'autre est la comparaison des résultats avec les seuils de la décision du conseil Directive Décharge du 19 décembre 2002 pour vérifier le caractère inerte, non dangereux voire dangereux du matériau/déchet. C'est l'essai de caractérisation de base recommandé par la Directive. Ce dernier, même s'il ne nous concerne pas directement, permet néanmoins de positionner le matériau par rapport aux inertes.

Principe de l'essai de percolation

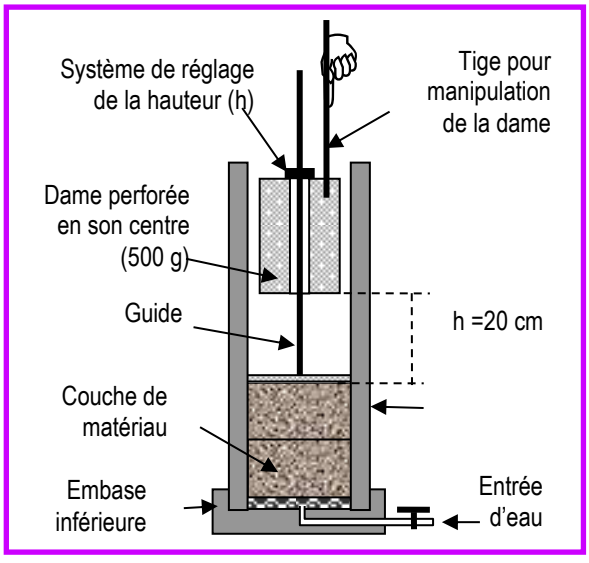
L'essai de percolation tel que défini dans la norme européenne TS 14 405 est destiné à caractériser le comportement des déchets / matériaux soumis à des conditions standards de percolation.

Mise en œuvre d'une colonne standard

Mise en place du matériau

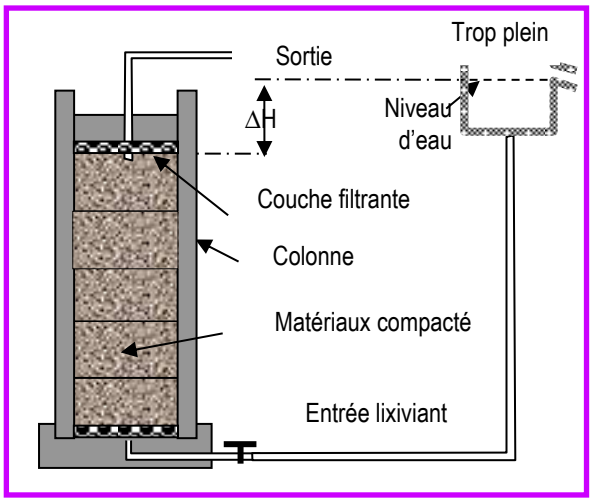
Les matériaux sont d'abord mélangés pour former une matrice homogène.

Le remplissage de la colonne est réalisé selon la méthode indiquée dans la norme. Le mélange est mis en place en cinq couches et chacune est mise en place en trois sous couches nivelées séparément. Chaque couche est compactée séparément avec le dispositif préconisé (voir le schéma ci-contre). Une couche de 1 cm de matériau granulaire drainant est prévue de part et d'autre de la colonne de matériau. A la fin du remplissage la colonne est pesée.



Remplissage en eau

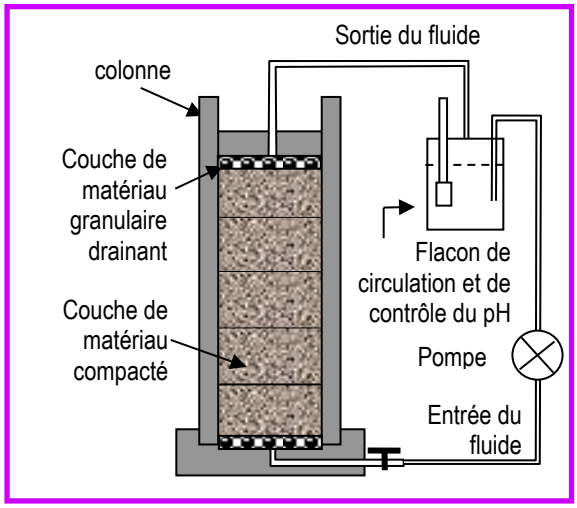
Le remplissage en eau est réalisé par le principe des bouteilles de Mariotte sous quelques centimètres (ΔH) de pression hydrostatique (voir le schéma ci-contre). Pour les matériaux ou déchets peu perméables, il peut être nécessaire d'augmenter la charge pour permettre le remplissage. Lorsque l'eau atteint le niveau supérieur de la colonne de déchet, cette dernière est isolée pour entamer la phase suivante.



Mise en équilibre

La mise à l'équilibre est réalisée par circulation d'un volume correspondant au ratio liquide solide de 0,1 et ce durant 72 heures (voir schéma ci-dessous). L'équilibre est contrôlé par la mesure du pH à 64 et 72 heures. L'équilibre est considéré atteint lorsque la variation de pH sur un laps de temps de 8 heures est inférieure à 0,3 unité. La circulation et l'alimentation sont réalisées avec une vitesse égale à 15 cm/jour à fût vide telle que préconisé par la norme.

Dans notre cas l'atteint de l'équilibre n'est pas nécessaire. Le but est de mesurer cette évolution dans des conditions réelles.



Réalisation de la percolation

Après les 72 heures de circulation et l'atteinte de l'équilibre, la circulation est arrêtée. La colonne est ensuite alimentée en eau déminéralisée et les percolats sont collectés successivement. La solution utilisée pour la circulation est complétée si nécessaire pour atteindre le ratio liquide solide de 0,1et prise pour le premier éluat.
La totalité des éluats est collectée en 5 prélèvements consécutifs correspondant à des ratios "masse de liquide sortant de la colonne" / "masse sèche initiale de déchet" (ratio L/S) cumulé 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 5 et 10.

Résultats des analyses et commentaires

L'ensemble des résultats est présenté sous forme de tableaux et de graphiques en annexe 2. Les résultats chiffrés pour chaque matériau sont regroupés dans un seul tableau. Les résultats graphiques sont donnés par élément pour trois sols construits simultanément. Les trois sols de composition binaire sont présentés ensemble et les trois autres sont présentés ensemble.

Dans les tableaux, les informations concernant le déroulement de l'essai (date masse, débit, etc.) sont regroupées dans la partie supérieure. Les résultats des analyses chimiques des constituants, sont donnés dans la partie inférieure. Dans la partie gauche du tableau, sont présentées les limites de détection et les concentrations mesurées sur les éluats en mg/l. les valeurs inférieures aux limites de détection sont remplacées par les limites correspondantes. Ces valeurs sont soulignées et écrites en gris.

Dans la partie droite sont présentées les teneurs calculées en mg/kg de matière sèche. Lorsqu'une concentration mesurée est inférieure à la limite de détection le résultat en mg/kg est calculé pour une concentration égale à la moitié de la limite de détection. Les deux dernières colonnes de droite présentent les seuils d'admission en décharge de déchets inertes et non dangereux pour le ratio liquide/solide de 10, selon la décision du conseil **Directive Décharge (DD)** du 19 décembre 2002**.**

pH & conductivité

Les pH des six mélanges oscillent globalement entre 7 et 8,5. La conductivité représente globalement les sels solubles. On notera que l'ensemble des courbes part d'un point élevé pour descendre assez rapidement pour finir à moins de 300 µS/cm sauf pour le mélange BR/CO qui termine à 1000 µS/cm. La courbe de ce mélange se situe nettement au-dessus des 5 autres. Ce mélange est constitué de 50% de CO et de 50% de BR. Ces derniers sont plutôt inertes. Le CO « Compost de déchets verts et de boues de STEP » semble être le constituant qui apporte le plus de composés soluble. Le mélange le plus pauvre en éléments solubles est le BA/SP. Il est constitué de 56% de « Ballasts usagés de chemins de fer » et 46% de « Boues papetières » ; Ces dernières sont constituées principalement de cellulose dont la biodégradabilité est plutôt lente.

Eléments chimiques

Les essais réalisés donnent un aperçu de la cinétique de relargage des divers éléments. Nous avons représenté à la fois les courbes des concentrations et des quantités extraites. L'ensemble des courbes sont représenté en annexe 2. Dans le cas actuel, nous avons besoin d'en extraire un avis global pour chaque mélange. Pour ce faire nous avons réalisé deux tableaux avec les quantités totales extraites des éléments métalliques toxiques pour le premier et des éléments ou composés bénéfiques du point de vue pédologique pour le second.

Eléments métalliques toxiques (métaux lourds)

Dans le Tableau 47 nous avons colorié pour chaque élément (soit ligne par ligne) la valeur la plus élevée en rouge, la plus faible en bleu et les valeurs intermédiaires sont nuancées selon leur distance des deux extrêmes. Les colonnes en bleu correspondent aux matériaux les moins polluant et plus les cases sont foncés moins le matériau est polluant. De même les colonnes comportant un maximum de cases rouges sont les plus polluants et plus les cases sont foncés plus le matériau est polluant. A noter toutefois qu'il s'agit juste d'une comparaison entre les matériaux. Il y a forcément un moins pollué et un plus pollué.
Pour situer ces concentrations par rapport à une référence, nous avons représenté sur une colonne les valeurs seuils de la mise en stockage des inertes. Les cases encadrées en rouge indiquent les valeurs dépassant la valeur seuil pour un élément. Ceci qui permet de constater que les sols construits sont tout de même très peu polluants.

Tableau 48 : Classement des mélanges selon leur capacité polluante par élément métallique toxique (mg/kg MS)

		Seuils des inertes	TA/CO	BR/CO	BA/SP	BA/DR/CO	TA/BA/BS	TA/BE/TV
Aluminium	**(Al)**		2,61	1,65	1,11	4,45	0,247	0,668
Antimoine	**(Sb)**	0,06	0,108	0,080	0,0069	0,047	0,0098	0,022
Arsenic	**(As)**	0,50	0,762	0,389	0,052	0,455	0,187	0,106
Baryum	**(Ba)**	20	0,007	0,118	0,130	0,180	0,260	0,092
Cadmium	**(Cd)**	0,04	0,0068	0,0067	0,004	0,0077	0,0038	0,0012
Chrome	**(Cr)**	0,5	0,031	0,023	0,003	0,037	0,0041	0,0027
Cuivre	**(Cu)**	2	0,604	0,311	0,220	0,572	0,209	0,039
Etain	**(Sn)**		0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Mercure	**(Hg)**	0,01	0,0010	0,0010	0,0010	0,0015	0,0010	0,0010
Molybdène	**(Mo)**	0,5	0,440	0,836	0,064	0,364	0,120	0,062
Nickel	**(Ni)**	0,40	0,077	0,056	0,028	0,073	0,113	0,013
Plomb	**(Pb)**	0,50	0,031	0,023	0,0042	0,061	0,012	0,0025
Sélénium	**(Se)**	0,10	0,011	0,042	0,0029	0,011	0,014	0,0040
Titane	**(Ti)**		0,101	0,113	0,033	0,110	0,015	0,010
Zinc	**(Zn)**	4,00	1,11	0,629	0,109	1,10	0,243	0,037

Noter que la colonne représentant le mélange BA/DR/CO comprend deux cases rouges du fait que nous n'avons pas de seuils pour ces deux éléments (aluminium et titane).
Seuls deux mélanges présentent chacun deux valeurs (encadrées en rouge dans le tableau ci-dessus) dépassant les valeurs seuils en antimoine et arsenic pour le TA/CO et en antimoine et molybdène pour le BR/CO.

On notera que cette représentation fait ressortir nettement les différences entre matériaux et nous permet de les classer aisément par exemple comme ci-dessous du moins polluant au plus polluant.

TA/BE/TV	BA/SP	TA/BA/BS	BA/DR/CO	BR/CO	TA/CO

Oligoéléments et composés utiles pour les plantes

Dans le Tableau 48, la comparaison est faite sur la base d'éléments utiles au sol technique, dont les valeurs élevées sont coloriées en vert et les plus faibles en blanc. De même que pour le tableau précédent, les colonnes qui comportent le plus de cellules vertes représentent le mélange le plus performant pour un sol végétal. Ces valeurs reflètent les quantités extraites avec un volume d'eau correspondant à un ratio liquide solide de 10, ce qui peut représenter 10 à 15 ans de pluie efficace (fraction d'eau qui s'infiltre). Il est évident qu'en réalité, avant qu'il ait reçu une telle quantité d'eau, le sol aura évolué et ces éléments seront certainement relargués avec une cinétique toute autre.

Tableau 49 : Classement des mélanges selon leur caractéristique pédologique (mg/kg MS)

		TA/CO	BR/CO	BA/SP	BA/DR/CO	TA/BA/BS	TA/BE/TV
COT		1382	1371	230	1138	446	137
Nitrates	**(NO3)**	1232	1987	145	1299	6,95	15,0
Orthophosphates	**(HPO3)**	181	59,3	5,30	127	173	2,88
Phosphore	**(P)**	67,8	27,7	3,12	54,8	64,5	1,67
Potassium	**(K)**	1042	1674	59,2	955	139	193
Cuivre	**(Cu)**	0,604	0,311	0,220	0,572	0,209	0,039
Molybdène	**(Mo)**	0,440	0,836	0,064	0,364	0,120	0,062
Zinc	**(Zn)**	1,11	0,629	0,109	1,10	0,243	0,037
Calcium	**(Ca)**	508	2476	462	549	131	669
Fer	**(Fe)**	24,8	17,9	3,55	34,6	13,2	0,435
Magnésium	**(Mg)**	143	513	40,7	151	52,5	8,54
Manganèse	**(Mn)**	1,78	4,23	0,356	1,93	1,05	0,046

De même que précédemment entre les mélanges, les différences sont suffisantes pour pouvoir les classer aisément par exemple comme ci-dessous du plus au moins riche.

BR/CO	TA/CO	BA/DR/CO	TA/BA/BS	BA/SP	TA/BE/TV

On constatera que le classement est quasiment inversé. Noter que trois éléments (cuivre, molybdène et zinc) sont à la fois éléments toxiques et oligoéléments nécessaires. La limite entre les deux situations peut être définie, soit par rapport aux seuils des inertes, soit par rapport aux teneurs optimales en agronomie.

Essai de simulation en colonne

Les six mélanges sont répartis grossièrement en deux catégories. Les trois mélanges comportant du compost sont prévus pour l'horizon de croissance. Le mélange TA/CO ne contenant pas un vrai déchet est prévu comme témoin. Les trois autres mélanges restants sont prévus pour des horizons profonds. Afin de mieux cerner la mobilité des divers éléments, nous avons réalisé six autres essais de percolations en superposant deux colonnes par essais. L'eau traverse d'abord une première colonne contenant un mélange de la première catégorie, puis alimente la deuxième colonne contenant un mélange de la deuxième catégorie.

Chacun des trois mélanges prévus pour horizon profond est testé deux fois, à chaque fois coiffé par un mélange (de type horizon de croissance) différent.

Tableau 50 : Composition des mélanges utilisés pour les essais de simulation

	1ère colonne	2ème colonne
	mélange utilisé pour produire la solution de percolation	mélange recevant des percolats
7	BR/CO +	TA/BA/BS
8	BR/CO +	TA/BE/DV
9	BA/DR/CO +	TA/BA/BS
10	BA/DR/CO +	TA/BE/DV
11	BR/CO +	BA/SP
12	BA/DR/CO+	BA/SP

Résultats et commentaires

Eléments chimique

De même que précédemment, nous avons réalisé deux tableaux avec les quantités totales extraites des éléments métalliques toxiques pour le premier et des éléments ou composés bénéfiques du point de vue pédologique pour le second.

Eléments métalliques toxiques (métaux lourds)

Dans le Tableau 50 nous avons colorié pour chaque élément (soit ligne par ligne) la valeur la plus élevée en rouge, la plus faible en bleu et les valeurs intermédiaires sont nuancées selon leur distance des deux extrêmes. Les colonnes en bleu correspondent aux matériaux les moins polluants et plus les cases sont foncées moins le matériau est polluant. De même les colonnes comportant un maximum de cases rouges sont les plus polluants et plus les cases sont foncées plus le matériau est polluant. A noter toutefois qu'il s'agit juste d'une comparaison entre les matériaux. Il y a forcément un moins pollué et un plus pollué.

De même que précédemment pour situer ces concentrations par rapport à une référence, nous avons représenté sur la première colonne les valeurs seuils de la mise en stockage des inertes.

On notera que les mélanges comparés aux seuils des inertes restent tout de même très peu polluant.

Tableau 51 : Classement des combinaisons de mélanges selon leur capacité polluante par élément métallique toxique (mg/kg MS)

		Seuils des inertes	BR/CO + TA/BA/BS	BR/CO + TA/BE/DV	BR/CO + BA/SP	BA/DR/CO + TA/BA/BS	BA/DR/CO + TA/BE/DV	BA/DR/CO+ BA/SP
Aluminium	**(Al)**	nd	0,811	0,891	2,54	1,52	1,98	3,52
Antimoine	**(Sb)**	0,060	0,024	0,030	0,033	0,022	0,038	0,022
Arsenic	**(As)**	0,500	0,465	0,355	0,358	0,540	0,378	0,386
Baryum	**(Ba)**	20,000	0,119	0,354	0,711	0,129	0,360	0,488
Cadmium	**(Cd)**	0,0400	0,0016	0,0026	0,0061	0,0019	0,0042	0,0051
Chrome	**(Cr)**	0,500	0,011	0,013	0,026	0,059	0,020	0,033
Cuivre	**(Cu)**	2,000	0,126	0,206	0,750	0,264	0,389	0,890
Etain	**(Sn)**	nd	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Mercure	**(Hg)**	0,0100	0,0010	0,0010	0,0015	0,0010	0,0016	0,0015
Molybdène	**(Mo)**	0,500	0,477	0,468	0,629	0,336	0,319	0,434
Nickel	**(Ni)**	0,400	0,173	0,086	0,208	0,215	0,106	0,217
Plomb	**(Pb)**	0,500	0,010	0,015	0,035	0,031	0,034	0,042
Selenium	**(Se)**	0,100	0,034	0,021	0,016	0,021	0,0093	0,0075
Titane	**(Ti)**	nd	0,037	0,045	0,080	0,055	0,063	0,096
Zinc	**(Zn)**	4,000	0,301	0,279	0,387	0,443	0,462	0,386

On notera ici que les combinaisons testées semblent peu polluantes, seuls deux combinaisons présentent une valeur chacune, supérieure aux seuils des inertes (case encadrée en rouge). On remarquera également que les sols recevant les percolats montrent une capacité de filtration/adsorption. On pourra dire que le sol BA/SP se comporte comme un vrai buvard. Ce mélange semble très intéressant car les éléments retenus par adsorption restent néanmoins disponible aux racines, ce qui le rend efficace dès le début avant son évolution qui devrait être lente (riche en cellulose).

Oligoéléments et composés utiles pour les plantes

Dans le Tableau 51 la comparaison est faite sur la base d'éléments utiles aux plantes donc les valeurs élevées sont coloriées en vert et les plus faibles en blanc. De même que pour le tableau précédent, les colonnes qui comportent le plus de cellules vertes représentent les combinaisons les plus performantes pour un sol amené à héberger du végétal.

Les combinaisons présentent toutes une richesse en 3 à 4 oligo-éléments, selon une répartition différente d'une combinaison à l'autre. Ces combinaisons ne devraient pas être classées, mais cataloguées en fonction de la nature des oligo-éléments qu'elles renferment, voire du type de plantes pour lesquelles elles sont le plus adaptées.

Tableau 52 : Classement des combinaisons de mélanges selon leur caractéristique pédologique (mg/kg MS)

		BR/CO + TA/BA/BS	BR/CO + TA/BE/DV	BR/CO + BA/SP	BA/DR/CO + TA/BA/BS	BA/DR/CO + TA/BE/DV	BA/DR/CO + BA/SP
COT		1418	836	1119	1825	875	1199
Nitrates	**(NO3)**	378	876	751	187	1206	890
Orthophosphates	**(HPO3)**	106	38,8	17,6	213	70,8	36,1
Phosphore	**(P)**	50,0	18,2	11,8	78,2	30,7	17,9
Potassium	**(K)**	775	916	984	714	836	746
Cuivre	**(Cu)**	0,126	0,206	0,750	0,264	0,389	0,890
Molybdène	**(Mo)**	0,477	0,468	0,629	0,336	0,319	0,434
Zinc	**(Zn)**	0,301	0,279	0,387	0,443	0,462	0,386
Calcium	**(Ca)**	1069	1654	1405	468	1059	842
Fer	**(Fe)**	61,8	8,22	26,1	76,3	15,1	28,7
Magnésium	**(Mg)**	277	194	226	164	115	118
Manganèse	**(Mn)**	4,73	1,40	1,55	3,31	1,13	1,42

V.2.d. Calculs géochimiques

Des calculs géochimiques ont été mis en place à partir des résultats des essais de percolation, afin de vérifier la balance ionique dans les éluats et effectuer un contrôle de solubilité. Les résultats présentés ici concernent les derniers éluats prélevés (fin de l'essai).

Matériel et méthodes

Tous les calculs géochimiques sont réalisés sous PHREEQC, un logiciel de calcul géochimique de systèmes triphasiques. La base de données thermodynamique utilisée est la base THERMDDEM (Blanc et al., 2007). Les données d'entrée intégrées dans PHREEQC sont les concentrations en anions et cations dans les éluats, ainsi que la valeur du pH des éluats. Le potentiel d'oxydo-réduction, qui n'a pas été mesuré lors des tests de lixiviation, a été fixé arbitrairement à 350 mV (conditions oxydantes). Les données de sortie exploitées sont les valeurs des balances ioniques et électriques, ainsi que les indices de saturation des phases minérales susceptibles de précipiter. L'indice de saturation est défini tel que SI = log (IAP/K), avec IAP le produit d'activité ionique et K la constante d'équilibre thermodynamique pour l'espèce considérée.

Résultats

Les résultats des calculs géochimiques concernant les balances ioniques pour chaque mélange de matériaux, y compris les mélanges mis en essai de simulation en colonne (§ V.2.c), sont répertoriés dans le Tableau 52.

Tableau 53 : Résultats des calculs géochimiques concernant la balance ionique et électrique

Matériau lixivié	pH	% erreur balance ionique	Écart de charge (meq)
TA/CO	7,43	1	0,7
BR/CO	7,21	7	11
BA/DR/CO	7,58	-5	-2
BA/SP	7,64	-2	-0,7
TA/BA/BS	7,58	-19	-6
TA/BE/DV	7,76	38	16
BR/CO+TA/BA/BS	7,18	38	38
BR/CO+TA/BE/DV	7,59	23	27
BA/DR/CO + TA/BA/BS	7,27	-9	-9
BA/DR/CO + TA/BE/DV	7,54	33	21
BR/CO + BA/SP	7,7	30	25
BA/DR/CO + BA/SP	7,6	-2	-2

Les pourcentages d'erreur de balance ionique situés en dessous de 20 % sont acceptables au regard des incertitudes qui sont liées :

- Aux limites analytiques ;
- Au potentiel redox fixé à une valeur arbitraire ;
- Aux incertitudes sur le carbone organique (non pris en compte dans le calcul géochimique).

Les pourcentages d'erreurs supérieurs à 20 % sont tous positifs, est correspondent à un déficit d'anions. Ce déficit serait lié au carbone organique non pris en compte dans les calculs géochimiques (acides organiques). Ce problème est visible surtout dans le cas des mélanges placés en essais de simulation de colonne.

Les résultats concernant les indices de saturation indiquent que plusieurs phases minérales pourraient précipiter d'un point de vue thermodynamique (indices de saturation supérieurs à 0 pour les phases en question). C'est le cas des oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium, de la rouille verte (hydroxyde double de Fe(II) – Fe(III)) et des phosphates pour tous les mélanges. En revanche, aucune précipitation potentielle de phosphates, sulfates ou de silice n'est susceptible d'intervenir.

La précipitation d'oxy-hydroxydes de fer et de rouille verte est intéressante car elle pourrait permettre d'abattre les teneurs en arsenic relargué, qui sont parfois un peu élevées (voir §.IV.3.a). En effet, les oxy-hydroxydes de fer et la rouille verte sont de très bons agents adsorbants de l'arsenic (Randall et al., 2001 ; Waychunas et al., 1995).

La précipitation potentielle des autres phases ne prête pas à conséquence d'un point de vue relargage ou piégeage de substances problématiques.

V.3. Caractérisation agronomique

Les **paramètres agronomiques** des mélanges retenus ont été caractérisés en appliquant des protocoles - normalisés pour la plupart - utilisés pour l'étude des matériaux au cours de la Tâche 2.

V.3.a. Matériel et méthodes

Préparation des échantillons

Pour toutes les mesures qui ont été réalisées, un échantillon représentatif de chaque matériau a été prélevé par la méthode du quartage. Les échantillons ont ensuite été séchés à l'air sous une serre à une température n'excédant pas 35°C. Certaines mesures ont été réalisées sur une fraction de l'échantillon inférieure à 2 mm (exigence norme).

Etude morpho-analytique

Le concept de l'étude morpho-analytique repose sur l'évaluation de la disponibilité des éléments amendants et fertilisants (C, N, P, K, entre autres) présents dans les mélanges étudiés. Il se base sur la corrélation entre les analyses physico-chimiques classiques (teneurs globales en éléments, cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote) et nos analyses de caractérisation (i) des phases solubles à l'eau (disponibilité des éléments C et N à court terme) et (ii) des phases solides des mélanges (disponibilité des éléments amendants et fertilisants à plus long terme) en microscopie électronique à transmission couplée à l'analyse (MET-EDX).
Dans les phases solides des mélanges, la disponibilité des éléments dans le temps est définie en fonction :

- de la nature des matières organiques (cellulose, lignines, etc.) et leur niveau de transformation (fragmentation et humification),
- du potentiel microbien (actif ou latent),
- de la localisation des éléments,
- des associations organo-minérales éventuellement présentes dans les mélanges

Paramètres physiques

L'**humidité résiduelle** des échantillons a été déterminée à 105°C suivant la norme NF ISO 11 465. La **granulométrie** a été déterminée en suivant la norme NF X 31-107. En complément sur les mélanges correspondants à l'horizon de croissance, une **étude granulométrique sur sol frais** a été conduite, ainsi qu'une mesure de la **stabilité structurale** par fractionnement granulodensimétrique, sans destruction des matières organiques et des ciments carbonatés (prestations Microhumus).

Fertilité chimique

La **matière organique totale** est déterminée en suivant la norme NF U 44-170. Le **carbone total** (organique+minéral) a été déterminé par combustion sèche Selon la norme NF ISO 10694. L'**azote total** (organique et minéral) est déterminé selon le protocole décrit dans la norme NF ISO 13878. Le calcaire total, **$CaCO_3$ total**, est déterminé après acidification de l'échantillon, par une solution d'acide chlorhydrique. La méthode utilisée est décrite dans la norme NF ISO 10693. La mesure de calcaire actif, **$CaCO_3$ actif**, est réalisée selon la méthode Drouineau et Drouineau-Galet. La méthode utilisée est décrite dans la norme AFNOR NF X 31-106. Le **pH eau** est mesuré après mise en suspension de l'échantillon de sol séché à l'air dans l'eau, avec un rapport 1/5 (v/v). La méthode utilisée est celle de la norme NF ISO 10390. La **CEC**, capacité d'échange cationique, correspond à la quantité de charges positives portées par les cations susceptibles d'être fixés, de façon réversible, sur les sites chargés négativement des constituants du sol. La détermination de la CEC selon la méthode de Metson est décrite dans la norme AFNOR NF X 31-130. La prise d'essai est de 2,5 g de sol broyé à 2 mm. La détermination des **cations échangeables**, se fait grâce à une solution de chlorure de cobaltihexammine ($Co(NH_3)_6Cl_3$). La méthode est décrite dans la norme NF X 31-130. Le **phosphore assimilable** est déterminé selon la méthode Olsen décrite dans la norme NF ISO 11263.

V.3.b. Résultats

Description des matériaux

Le produit BA-DR-CO est un mélange de ballasts + déchets issus du nettoyage des rues + compost de déchets verts-boues de STEP de couleur noire. On observe des ballasts grossiers, des résidus ligneux plus ou moins grossiers et des particules fines. Des développements microbiens blanchâtres sont observés sur les résidus ligneux (Figure 52).



Figure 52 : Vue du mélange BA-DR-CO

Le produit BR-CO est un mélange de briques + compost de déchets verts-boues de STEP de couleur noire. On observe des fragments de briques plus ou moins grossiers, des résidus ligneux plus ou moins grossiers, et des particules fines (Figure 53).



Figure 53 : Vue du mélange BR-CO

Le produit TA-CO est un mélange de terre acide + compost de déchets verts-boues de STEP de couleur brune. On observe de nombreux graviers, des résidus ligneux plus ou moins grossiers et des particules fines (Figure 54).



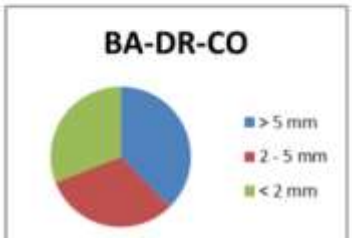
Figure 54 : Vue du mélange TA-CO

Granulométrie sur sol frais et description des fractions

Pour le mélange BA-DR-CO (Figure 55), la fraction grossière > 5 mm est essentiellement composée de ballasts et graviers. Les résidus ligneux grossiers (peu présents) sont en cours de transformation (les tissus sont noirs) et présentent de nombreux filaments mycéliens. Les résidus ligneux sont très présents dans la fraction 2 – 5 mm. Ils sont en cours de transformation et présentent de nombreux filaments mycéliens. La fraction fine < 2 mm est composée principalement de particules fines noires et de résidus ligneux noircis. Les résidus ligneux sont en cours de transformation et présentent de nombreux filaments mycéliens.



> 5 mm	2 - 5 mm	< 2 mm
37,6 % pondéral	31,4 % pondéral	31,0 % pondéral



Remarque sur la granulométrie du produit :

Les 3 fractions représentent pondéralement le tiers du produit BA-DR-CO chacune.

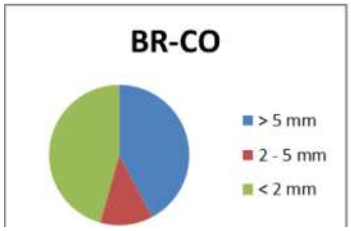
Figure 55 : Granulométrie sur frais du mélange BA-DR-CO

Pour le mélange BR-CO (Figure 56), la fraction > 5 mm est composée essentiellement de fragments grossiers de briques. Les résidus ligneux grossiers (peu présents) sont en cours de transformation (les tissus sont noirs) et présentent de nombreux développements microbiens. Ces résidus sont enrobés de particules fines noires et de petits fragments de brique. Les résidus ligneux sont très présents dans la fraction 2 – 5 mm. Ils sont en cours de transformation et présentent de nombreux filaments mycéliens. Ces résidus sont enrobés de particules fines noires et de petits fragments de brique. Les fragments de brique sont nettement moins présents que dans la fraction grossière. La fraction fine < 2 mm est essentiellement

composée de particules fines noires et de résidus ligneux qui présentent de nombreux filaments mycéliens. Les particules de couleur orange (briques) sont peu présentes.



> 5 mm	2 - 5 mm	< 2 mm
42,2 % pondéral	12,2 % pondéral	**45,6 % pondéral**



Remarque sur la granulométrie du produit :

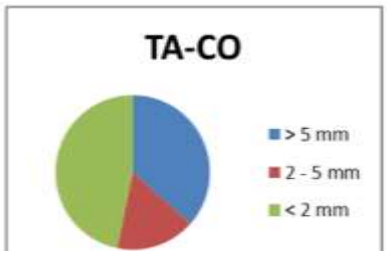
Le produit BR-CO est à la fois grossier et fin : la fraction > 5 mm et < 2 mm représentent pondéralement presque la moitié du produit chacune.

Figure 56 : Granulométrie sur frais du mélange BR-CO

Pour le mélange TA-CO (Figure 57), les graviers représentent pondéralement la quasi-totalité de la fraction grossière > 5 mm. Les résidus ligneux grossiers (peu présents) sont enrobés de particules fines minérales et sont en cours de transformation (les tissus sont noirs). Les graviers sont pondéralement majoritaires dans la fraction 2 – 5 mm. Les résidus ligneux grossiers, moins présents, sont enrobés de particules fines minérales et présentent un développement microbien en surface (hyphes fongiques). La fraction fine < 2 mm est majoritairement composée de particules minérales. Les résidus organiques figurés sont peu présents (fraction fine peu fibreuse). Des champignons colonisent les résidus organiques et jouent un rôle dans la macro-agrégation.



> 5 mm	2 - 5 mm	< 2 mm
36,6 % pondéral	16,6 % pondéral	**46,8 % pondéral**



Remarque sur la granulométrie du produit :

La fraction fine < 2 mm représente presque la moitié du produit TA-CO.

Figure 57 : Granulométrie sur frais du mélange TA-CO

Fractionnement granulo-densimétrique

Le résultat de l'analyse du fractionnement granulo-densimétrique (Figure 58) complète les résultats décrits ci-dessus. Il apparaît ainsi que les mélanges BA-DR-CO et BR-CO sont très majoritairement constitués de particules ou d'associations organo-minérales stables à l'eau dont la taille est supérieure ou égale à 50 µm (respectivement 75 et 72,5 %). Dans le cas du mélange TA-CO, cette proportion est sensiblement plus faible (54 %). Cette valeur traduit à la fois l'état actuel d'agrégation du mélange (des particules de petite taille peuvent s'associer pour former des agrégats de plus gros diamètre) et une indication sur le potentiel d'agrégation des matériaux en sachant que la fraction 2 à 50 µm est la plus réactive et la plus susceptible de contribuer à l'agrégation. En l'occurrence, au vu des informations disponibles sur la texture des matériaux constitutifs mis en évidence au cours de la tâche 2, il apparaît que les mélanges, peu de temps après leur réalisation, sont faiblement agrégés et présentent un faible potentiel d'agrégation.

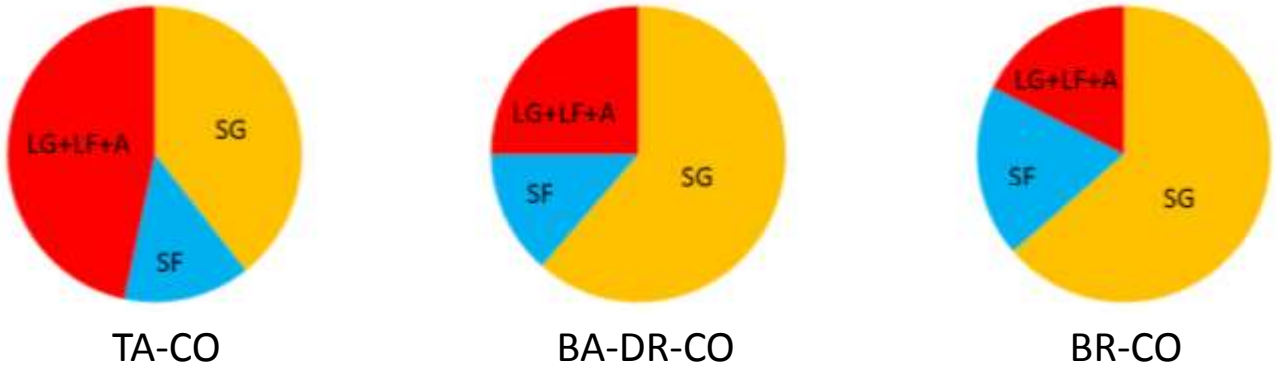


Figure 58 : Répartition des fractions granulo-densimétriques après désagrégation contrôlée dans l'eau des fractions < 2 mm

Caractérisation des matières organiques figurées

BA-DR-CO : Les résidus végétaux « figurés » (visuellement reconnaissables) de la taille des sables grossiers (200 – 2000 µm) sont composés de matières organiques en cours de transformation, et sont peu enrobés de particules fines. Les résidus ligneux sont colonisés par de nombreux microorganismes actifs (bactéries et champignons). Des fragments de plastique ont été fréquemment observés dans cette fraction.

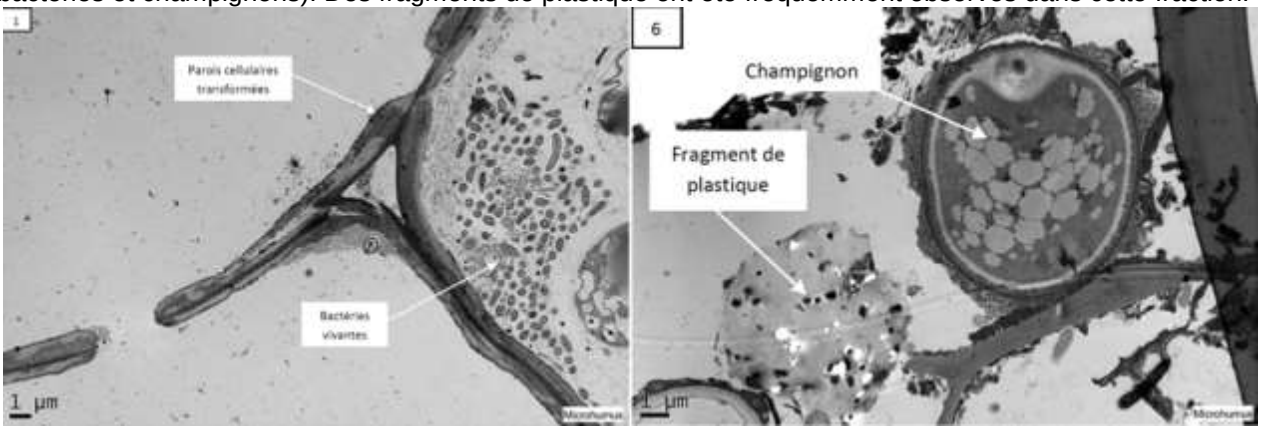


Figure 59 : Images en MET de la fraction 200 – 2000 µm du mélange BA-DR-CO

BR-CO : Les résidus végétaux « figurés » (visuellement reconnaissables) de la taille des sables grossiers (200 – 2000 µm) sont composés de matières organiques en cours de transformation. Ces résidus ligneux sont enrobés de particules fines principalement d'origine organique (quasi absence de minéraux dans l'enrobage). Des champignons vivants et actifs ont été observés dans ces résidus.

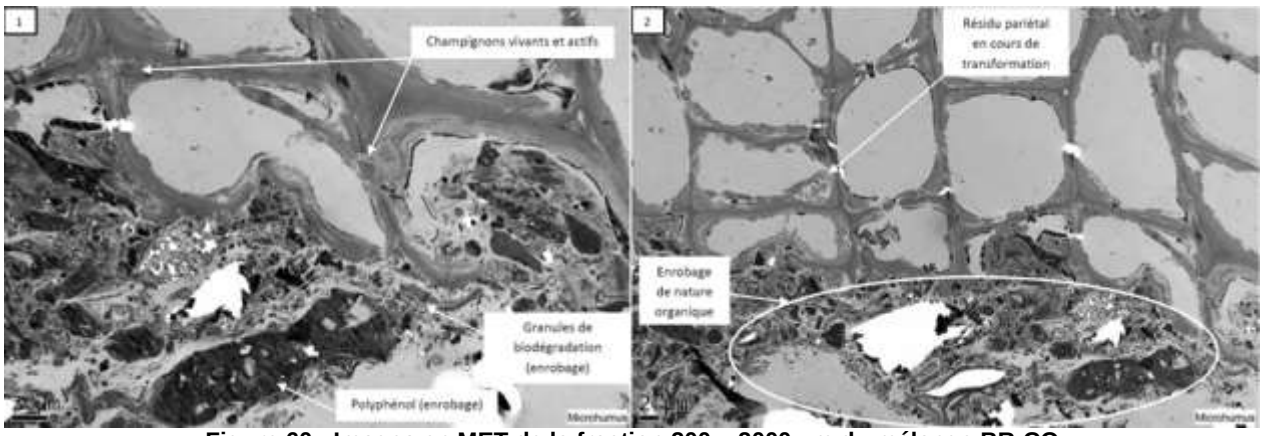


Figure 60 : Images en MET de la fraction 200 – 2000 µm du mélange BR-CO

TA-CO : Les résidus végétaux « figurés » (visuellement reconnaissables) de la taille des sables grossiers (200 – 2000 µm) sont composés de matières organiques en cours de transformation. Des substances polyphénoliques sont très présentes dans ces résidus végétaux (elles donnent la couleur noire aux résidus ligneux observés sous loupe binoculaire). Une activité fongique est observée dans ces résidus.

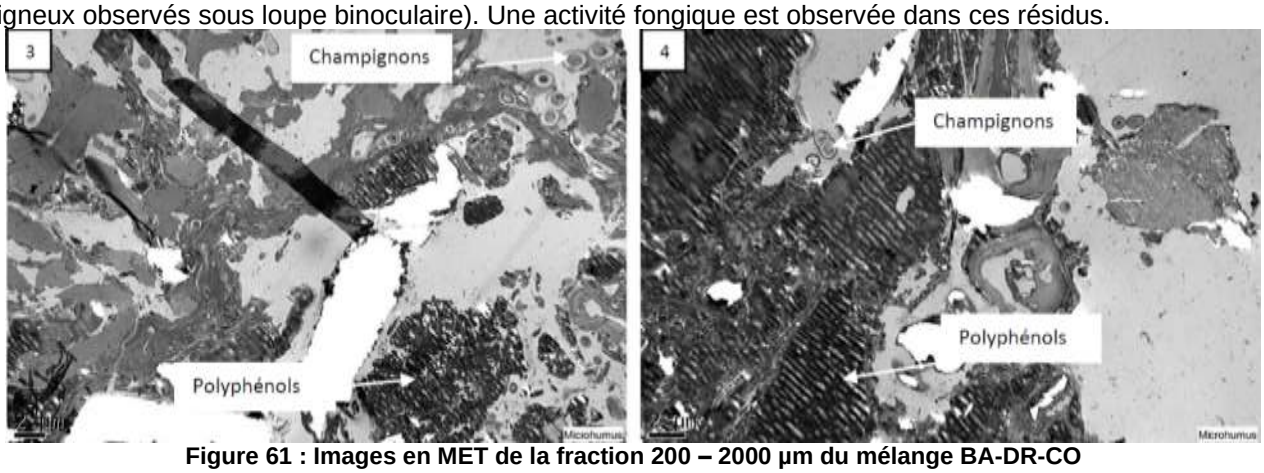


Figure 61 : Images en MET de la fraction 200 – 2000 µm du mélange BA-DR-CO

Caractérisation des associations organo-minérales dans le compartiment des limons grossiers, limons fins et argiles

BA-DR-CO : la fraction < 50 µm du produit BA-DR-CO (limons grossiers + limons fins + argiles) est essentiellement composée de matières organiques associées plus ou moins à des minéraux, l'ensemble sous forme de micro-agrégats individualisés. Il est important de souligner la présence de résidus microbiens dont le caractère pathogène pourrait être à surveiller.

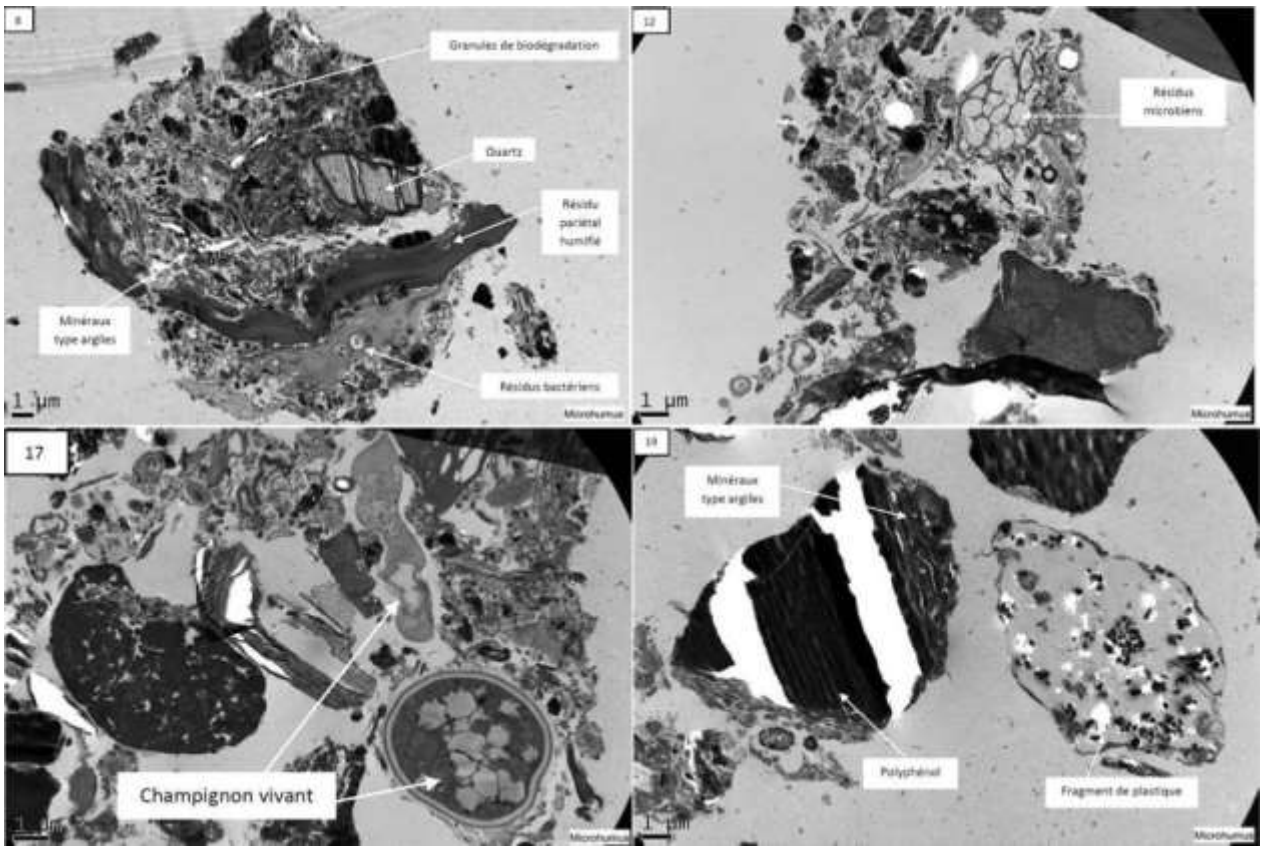


Figure 62 : Images en MET de la fraction < 50 µm du mélange BA-DR-CO

BR-CO : la fraction < 50 µm du produit BR-CO (limons grossiers + limons fins + argiles) est essentiellement composée de matières organiques qui forment une matrice plus ou moins dispersée. Ces matières organiques sont associées aux bactéries et aux champignons du compost. Des micro-agrégats de nature essentiellement organique (« holorganique ») sont fréquemment observés. Les minéraux sont très peu présents dans la fraction < 50 µm. Quelques quartzs ont néanmoins été observés dans certains micro-agrégats.

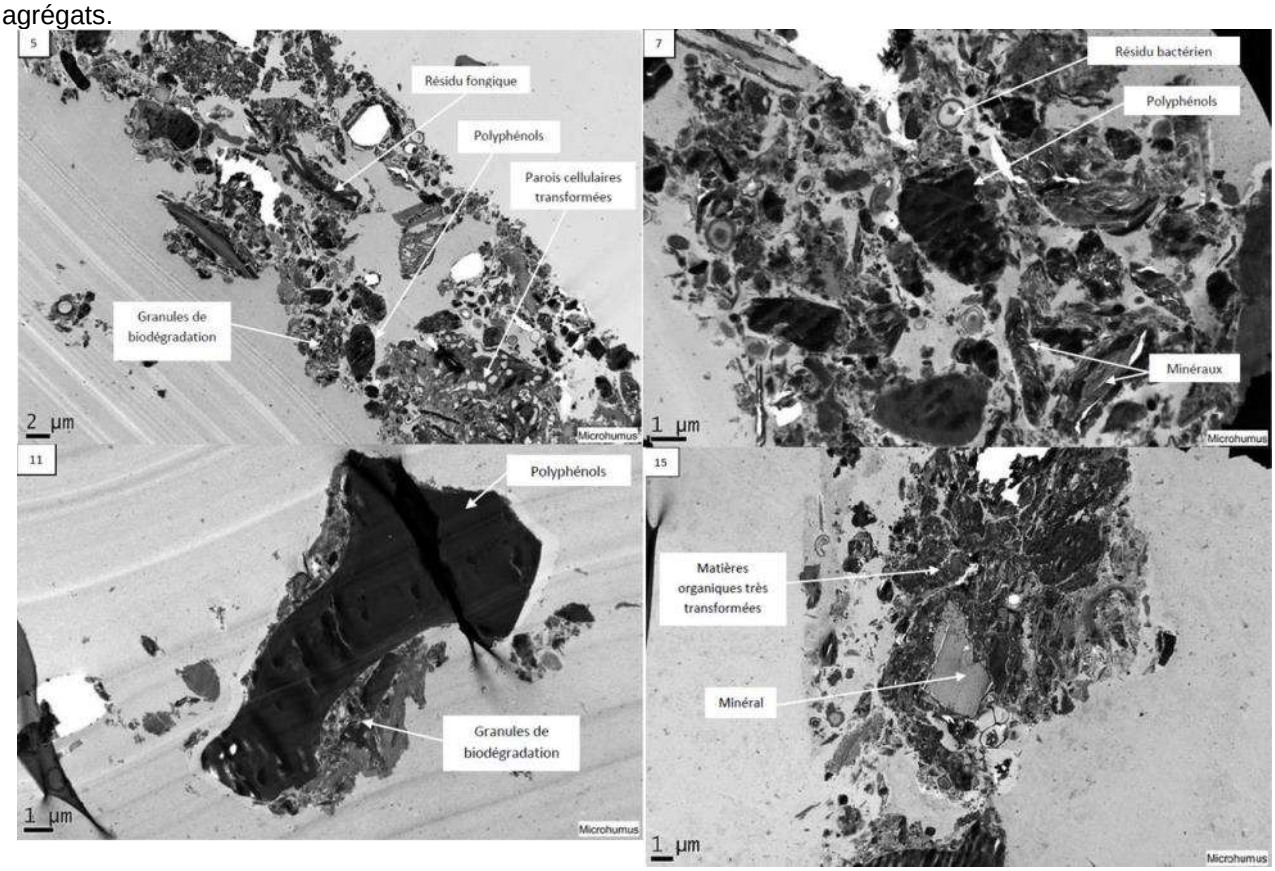


Figure 63 : Images en MET de la fraction < 50 µm du mélange BR-CO

TA-CO : La fraction < 50 µm (limons grossiers + limons fins + argiles) du produit TA-CO est essentiellement composée de minéraux de type quartz et argiles. Les matières organiques sont peu présentes dans cette fraction. Des micro-agrégats organo-minéraux initialement présents dans la terre acide (avant le mélange avec le compost) ont été ponctuellement observés. Ces micro-agrégats sont composés de matières organiques très transformées et humifiées ou d'exsudats microbiens, et fortement associées aux minéraux de la terre.

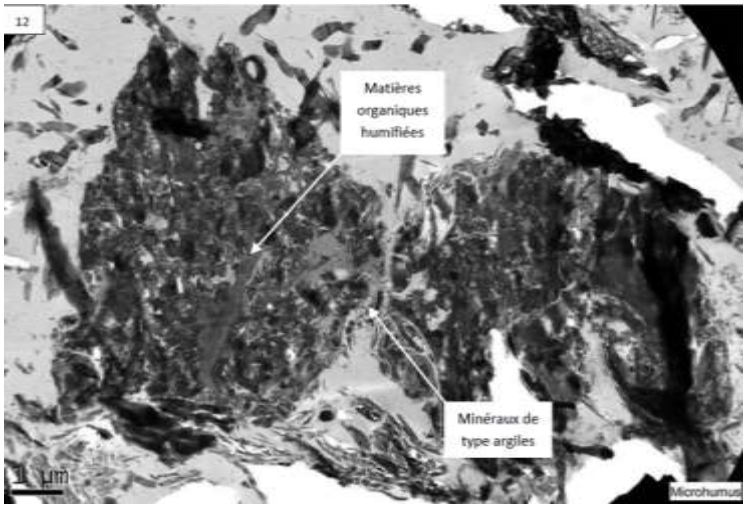


Figure 64 : Image en MET de la fraction < 50 µm du mélange TA-CO

Propriétés physiques

Les mesures de texture ont été conduites à la fois sur les matériaux avant et après décarbonatation, prenant ainsi en compte la contribution des ciments carbonatés à la création d'associations organo-minérales (Tableau 53).
Hormis, le mélange TA-CO qui présente 50 % de fractions fines (argiles et limons fins), tous les autres présentent une large majorité de fractions grossières. La décarbonatation qui a été appliquée ne change pas fondamentalement ces résultats ce qui indique que, conformément aux résultats sur la stabilité structurale, le potentiel de libération de particules fines est très limité.

Tableau 54 : Granulométrie avec et sans décarbonatation des mélanges sélectionnés

Paramètre	**A**	**LF**	**LG**	**SF**	**SG**	**A**	**LF**	**LG**	**SF**	**SG**
Méthode	sans décarbonatation					après décarbonatation				
Unité	$g.kg^{-1}$									
TA CO	100	442	184	102	172	109	446	154	146	144
BR CO	134	157	69	80	560	160	101	56	69	605
BA DR CO	112	129	101	187	471	90	86	67	143	590
BA SP	125	207	87	126	455	88	66	40	78	521
TA BA BS	35	116	84	158	607	33	124	92	175	574
TA BE DV	44	167	100	138	551	53	173	81	90	519

Propriétés chimiques

Il est possible de distinguer deux classes de pH pour les mélanges étudiés (Tableau 54). D'une part les mélanges destinés à être utilisés comme horizon de croissance (TA-CO, BR-CO, BA-DR-CO) qui sont neutre à légèrement alcalin (7,3 < pH < 7,8) et d'autre part les mélanges destinés à être utilisés comme horizons squelette et technique (BA-SP, TA-BA-BS, TA-BE-DV) qui sont très alcalins (8,2 < pH < 10,7). Cette distinction est également perceptible sur des paramètres agronomiques (C_{org}, N_{tot}, P_{dispo} et CEC) (Tableau 54, Tableau 55) qui mettent en évidence la forte fertilité des mélanges destinés à être utilisés comme horizon de croissance et à l'opposé une faible fertilité des autres mélanges. Deux mélanges (BA-SP, TA-BE-DV) sont fortement carbonatés ($[CaCO_3]_{tot}$ = 206 et 83,5 $g.kg^{-1}$ respectivement) et présentent des concentrations significatives en calcaire actif ($[CaCO_3]_{actif}$ = 116 et 19 $g.kg^{-1}$ respectivement). Les autres mélanges sont faiblement carbonatés ($[CaCO_3]_{tot}$ < 10 $g.kg^{-1}$). Ceci entraîne une saturation ou une sur-saturation du complexe d'échange cationique par les ions Ca^{2+}.

Tableau 55 : Propriétés chimiques des mélanges sélectionnés (1/2)

	pH	**C_{tot}**	**C_{org}**	**M.O.**	**Black C**	**C/N**	**N_{tot}**	**$CaCO3_{tot}$**	**$CaCO_{3actif}$**
Unité	-	$g.kg^{-1}$							
TA CO	7,3	33,8	33,6	57,9	0,643	8,5	3,94	1,3	-
BR CO	7,4	93,1	92,0	158,3	1,74	10,2	8,99	9	-
BA DR CO	7,8	94,5	91,7	157,7	1,79	13,7	6,71	23,6	-
BA SP	8,6	57,5	32,8	56,4	1,36	36,9	0,888	206	116
TA BA BS	8,2	7,6	7,3	12,6	0,68	8,5	0,865	2,2	-
TA BE DV	10,7	23,6	13,6	23,4	0,622	27,8	0,488	83,5	19

Tableau 56 : Propriétés chimiques des mélanges sélectionnés (2/2)

	P_{dispo}	CEC	Ca	Mg	K	Na	Al	Mn	Fe
Unité	$g.kg^{-1}$	$cmol^{+}.kg^{-1}$							
TA CO	0,357	10,9	9,5	2,27	3,04	0,952	0,0304	0,012	0,0059
BR CO	0,55	24,2	36,1	4,59	6,27	2,22	0,00774	0,019	0,0107
BA DR CO	0,549	18,5	16,3	3,77	4,8	1,55	0,0277	0,018	0,0128
BA SP	0,07	2,43	6,01	0,521	0,191	0,166	0,0747	0,005	0,0089
TA BA BS	0,089	3,16	3,16	0,412	0,214	0,127	0,0593	0,005	0,0151
TA BE DV	0,064	4,85	11,1	0,153	0,818	0,172	0,126	0,005	0,005

V.4. Caractérisation écotoxique et évaluation des agents pathogènes

V.4.a. Rappel des méthodologies

Tests de phytotoxicité Orge et Cresson

Ce test a pour objectif de vérifier l'innocuité d'un produit vis-à-vis de l'émergence et de la croissance de l'orge et du cresson. Cet essai est réalisé selon la norme XP U 44-167 (2005). Les indicateurs retenus sont l'émergence et la croissance pour chacune des plantes tests.
Le test est effectué sur les mélanges bruts sans modification (tamisage, etc.). Le témoin est un sol artificiel (substrat de référence décrit dans la norme ISO NF 11268-2 : mélange de 70% de sable de Fontainebleau, 20 % de kaolinite et 10 % de sphaigne).
Les effets des mélanges sur le taux de germination et la production de biomasse aérienne (matière sèche) des deux plantes-test sont comparés à un témoin sur substrat témoin. Quatre répétitions sont réalisées pour chaque traitement.
La germination et la croissance s'effectuent en phytotron, en conditions de température, de luminosité et d'humidité contrôlées. L'étude de l'émergence est effectuée 48h après que 70% des graines dans les pots témoins ont émergé. La récolte s'effectue généralement 16-17 jours après le semis. Les plantes sont récoltées, pesées (matière fraîche), séchées en étuve (40°C) puis pesées à nouveau (matière sèche).

Test d'évitement Vers de terre

L'objectif de cet essai est d'évaluer la fonction d'habitat des sols ainsi que l'influence des contaminants sur le comportement des vers de terre. Cet essai est réalisé selon la norme ISO/FDIS 17512-1 (2008). Il constitue une méthode rapide qui reflète la biodisponibilité pour les espèces *Eisenia fetida* et *Eisenia andrei* des matériaux étudiés. Le comportement d'évitement constitue le critère d'effet de cet essai.
Dans un dispositif à deux compartiments contigus, dix vers de terre adultes sont exposés simultanément à un sol témoin (substrat de référence décrit dans la norme ISO NF 11268-2) et au mélange testé brut ; les vers ont ainsi le choix entre ces deux substrats. Cinq réplicats sont réalisés pour chaque dilution testée. Après une exposition de 48h, un comptage des vers de terre présents dans chaque compartiment est réalisé.

Toxicité aiguë Vers de terre

Ce test permet l'évaluation de la toxicité aiguë du produit étudié vis-à-vis d'un macroorganisme édaphique, un ver de terre. Cet essai est réalisé selon la norme NF EN ISO 11 268-1. L'indicateur retenu est le taux de mortalité des vers de terre.
Les échantillons de déchet sont dilués avec substrat de référence décrit dans la norme ISO NF 11268-2 (mélange de 70% de sable de Fontainebleau, 20 % de kaolinite et 10 % de sphaigne).
Chaque lot d'essai est testé en quatre répliques (une réplique pour l'essai préliminaire). 10 vers sont introduits dans des bocaux en verre de capacité de deux litres non hermétiquement fermés pour permettre des échanges entre le milieu et l'atmosphère. La masse de sol testé est de 500 g par récipient.
Après 7 et 14 jours d'exposition, le nombre de vers vivants dans les dilutions est déterminé.
L'essai se déroule en 2 étapes :
- un essai préliminaire de 14 jours qui permet de définir les concentrations faisant passer la mortalité des vers de terre de 0 % à 100%;
- un essai définitif pour lequel une série de 5 dilutions est réalisée (en se plaçant aux bornes des dilutions pour lesquelles la mortalité passait de 0 à 100 % lors de l'essai préliminaire).

Test d'inhibition de la croissance algale *Pseudokirchneriella subcapitata*

Ce test a pour objectif d'évaluer la toxicité aiguë du produit étudié vis-à-vis d'une algue selon la norme NF EN ISO 8692,2005. Le test est réalisé sur un lixiviat (EN 12457-2:2001) du matériau brut.
Les algues (*Pseudokirchneriella subcapitata*) sont incubées à 22°C +/- 2°C, sous illumination (environ 7500 lux) et agitation constante pendant 72 heures, dans différentes dilutions de l'échantillon, chacune étant testée six fois (test réalisé en microplaques). Les concentrations algales sont mesurées par fluorimètrie après 72 heures d'incubation et les pourcentages d'inhibition du taux de croissance sont calculés par rapport aux témoins (6 répliques) réalisés dans les mêmes conditions.

Tests de phytotoxicité *Lemna minor*

L'objectif est de déterminer la phytotoxicité d'un produit sur des lentilles d'eau sauvages (*Lemna minor*) selon la norme ISO 20079 (2005). Il s'agit de comparer, en conditions contrôlées, la croissance des frondes de populations de lentilles d'eau cultivées dans un milieu témoin à celle de populations placées dans des milieux contenant le produit à tester à différentes concentrations. Les essais ont été réalisés sur un lixiviat (EN 12457-2:2001) de déchet brut, filtré à 0,45µm avant les essais.
Une gamme de dilutions des lixiviats est testée (dilution dans de l'eau distillée). Une même quantité de solution nutritive est apportée dans chaque modalité. De ce fait, la concentration testée la plus importante est de 90% de lixiviat. Seize frondes de lentilles d'eau sont repiquées dans un bécher contenant 150 mL de lixiviat ou de milieu de culture pour la modalité Témoin. Chaque modalité est répétée 6 fois. Les béchers sont placés dans une enceinte régulée avec des conditions optimales pour la croissance des lentilles d'eau. Un comptage du nombre de frondes totales, même naissantes, est effectué 7 jours après le repiquage. Les frondes sont mises à l'étuve afin de pouvoir mesurer la matière sèche produite.
Les critères d'effet mesurés sont le taux de croissance et la matière sèche après 7 jours de croissance.

Test de toxicité aiguë *Daphnia magna*

Ce test permet d'évaluer la toxicité aiguë du produit étudié vis-à-vis d'un microcrustacé d'eau douce, selon la norme NF EN ISO 6341 (1996). Le test est réalisé sur un lixiviat (EN 12457-2:2001) du matériau brut. Après 24h et 48h, le taux d'immobilisation d'une population de daphnies adultes (*Daphnia magna*) repiqués dans les lixiviats est mesuré.
La sensibilité du matériel biologique est contrôlée par un test au bichromate de potassium qui permet de calculer une immobilisation corrigée tenant compte de l'état physiologique de la population de daphnies. Le pH du lixiviat peut être ajusté afin d'être compris entre 5,5 et 8,5.
Le critère d'effet mesuré est le taux d'immobilisation des daphnies après 24h et 48h.

Tests de génotoxicité *Vicia faba*

Ce test permet d'évaluer le potentiel génotoxique d'une matière organique ou d'une substance en milieu solide ou liquide vis-à-vis d'une plante test : la fève (*Vicia faba*). Cet essai est réalisé selon la norme NF ISO 29200. L'indicateur retenu est la conservation de l'intégrité physique du noyau au cours de la division cellulaire (apparition de micronoyaux).
La fréquence d'apparition de micronoyaux dans les cellules des racines secondaires de plantules de fève est mesurée après 72 heures de croissance dans le mélange brut à tester ou 48h dans 100% du lixiviat (EN 12457-2:2001) de déchet brut non filtré.
La présence d'un micronoyau dans une cellule révèle l'action toxique du produit étudié sur le matériel génétique de la plante. Les résultats obtenus sont statistiquement comparés avec ceux de témoins. Afin de vérifier la validité du test, un comptage des cellules en cours de division est réalisé en parallèle. Le comptage des cellules contenant des micronoyaux (dites "cellules micronucléées") permet d'estimer la toxicité du produit sur le matériel génétique de la plante et le comptage des cellules en cours de division permet d'estimer la toxicité globale sur le développement de l'organisme.

Evaluation des agents pathogènes

La caractérisation des pathogènes (12 agents biologiques) a porté sur une part des matériaux individuels et des mélanges étudiés dans le cadre du programme ADEME-SITERRE : les cinq matériaux individuels les plus organiques et six mélanges.

Liste agents pathogènes caractérisés :
Salmonelles, *Listeria monocytogenes*, Larves de nématodes, Œufs de nématodes, Micro-organismes aérobies à 30 °C, Levures et moisissures, *Escherichia coli*, *Aspergillus*, Staphylocoques à coagulase, Entérocoques fécaux, *Clostridium perfringens* (formes végétatives), *Clostridium perfringens* (spores).

Les mélanges caractérisés :
(1) Brique (BR) / Compost (CO) ; **(2)** Ballast (BA) / Déchet de balayage des rues (DR) / Compost (CO) ; **(3)** Terre excavée acide (TA) / Compost (CO) ; **(4)** Ballast (BA) / Boues papetières (SP) ; **(5)** Terre excavée acide (TA) / Ballast (BA) / Boues de STEP (BS) ; **(6)** Terre excavée acide (TA) / Béton (BE) / Déchets verts (DV).

V.4.b. Résultats des essais sur les organismes terrestres

L'ensemble des essais ont été réalisés sur les mélanges bruts.

Les bioindicateurs exposés sont les suivants :
- Orge et cresson (végétaux supérieurs, producteurs primaires)
- Vers de terre (invertébrés, consommateurs primaires)

Évaluation de l'innocuité vis-à-vis de végétaux supérieurs : *Tests de phytotoxicité Orge et Cresson*

Afin de pouvoir comparer les résultats des essais menés en parallèle sur les mélanges, les résultats ont été exprimés en pourcentage d'inhibition par rapport à la valeur obtenue dans la modalité Témoin (ainsi la valeur « 100 » signifie que le mélange testé entraine 100% d'inhibition par rapport au témoin, ce qui dans le cas présent signifie qu'aucune graine n'a germée). Les auteurs d'une étude ADEME[1] sur l'écotoxicité de matières fertilisantes proposent un seuil de significativité biologique à 25%, ce qui signifie que l'effet n'est pas considéré comme significatif s'il est inférieur à cette valeur.
Les résultats d'émergence et de croissance sont présentés sur la Figure 65 pour l'orge et sur la Figure 66 pour le cresson.

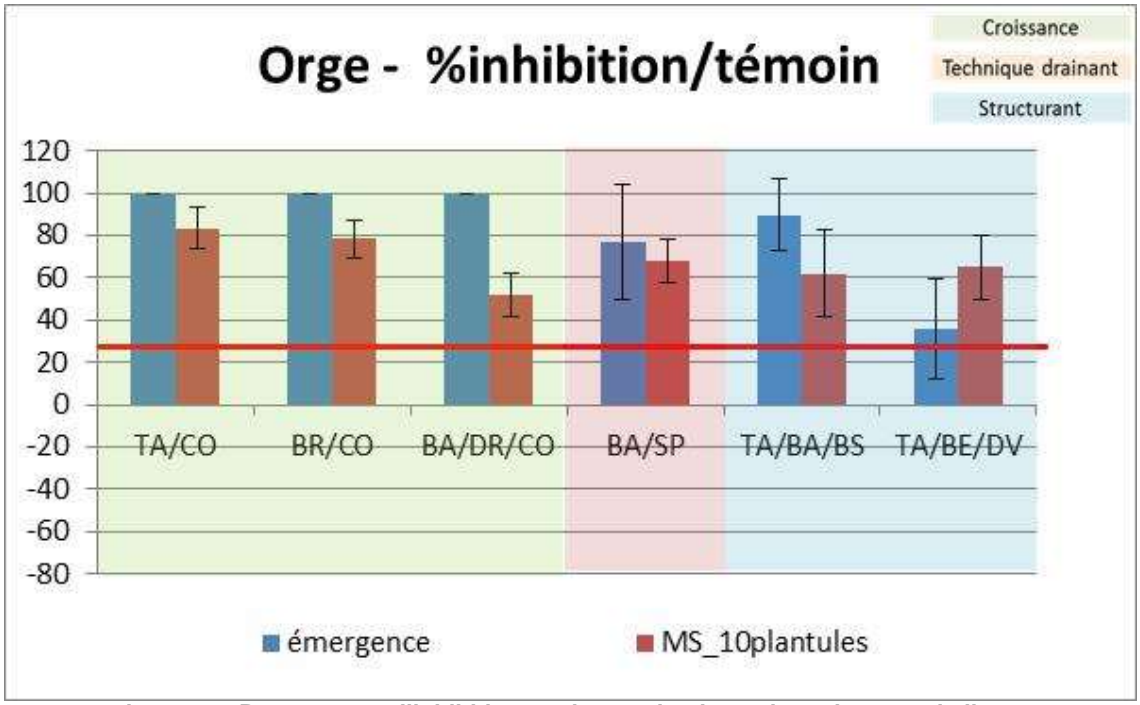


Figure 65 : Pourcentage d'inhibition sur la germination et la croissance de l'orge sur les différentes modalités de mélanges

[1] *Charissou AM ; Pandard P.,Cossu-Leguille C., Chenon P, Nassr N (2012) Développement d'un protocole d'évaluation de l'écotoxicité des matières fertilisantes organiques utilisées en fertilisation agricole, Convention ADEME n°09-75-C0061,*

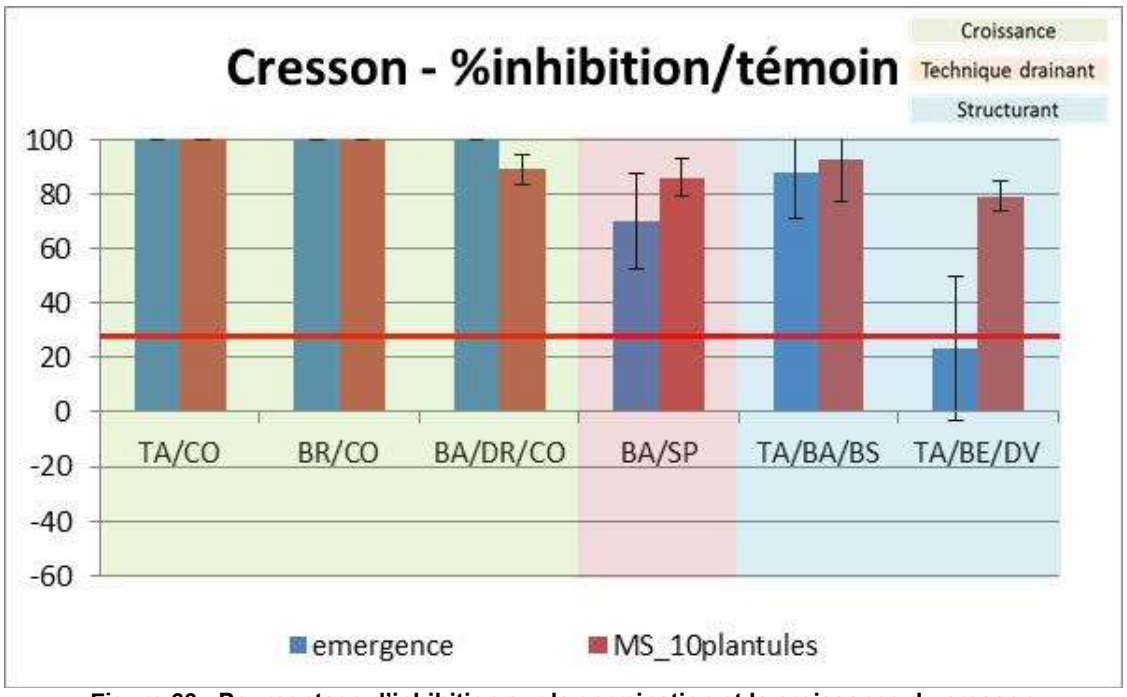


Figure 66 : Pourcentage d'inhibition sur la germination et la croissance du cresson sur les différentes modalités de mélanges

Tous les mélanges présentent un impact négatif sur la germination et la croissance de l'orge et du cresson.

Pour les mélanges correspondant à l'horizon de croissance (figurés dans la zone verte des figures), le taux de germination est égal à 0. Ces mélanges ont donc inhibé à 100% la germination des graines d'orge et de cresson lors de l'évaluation de ce paramètre, c'est-à-dire entre 4 et 5 jours après le semis selon l'espèce considérée. Cependant, des graines d'orge ont germé postérieurement à ce comptage permettant donc en fin d'essai d'obtenir des plantules dont il a été possible de calculer la biomasse. La croissance s'est avérée très faible et les taux d'inhibition sont de 80 % pour les mélanges TA/CO et BE/CO. Pour le mélange BA/DR/CO, malgré un fort retard de germination, le taux de croissance est moins inhibé et est de l'ordre de 40 à 50%.
Pour le cresson, il y a également eu un retard de germination pour la modalité BA/DR/CO mais la croissance est restée très faible et l'inhibition par rapport au Témoin est de 90%.

Pour le mélange BA/SP destiné à l'horizon Technique drainant (figuré dans la zone rouge sur les figures), l'effet inhibiteur est moindre mais reste cependant très élevé. La germination de l'orge est inhibée à 80% et celle du cresson à 70%. La croissance est inhibée dans le cas des 2 végétaux à hauteur de 80 à 90%.

Dans le cas des mélanges de l'horizon structurant (figurés dans la zone bleue sur les figures), le mélange TA/BA/BS présente des résultats similaires au mélange drainant TA/SP avec un taux de germination inhibé à 90 % pour l'orge et le cresson, et un taux de croissance inhibé à 60% pour l'orge et 90% pour le cresson.
Le mélange TA/BE/DV est le seul qui présente un faible pourcentage d'inhibition de la germination puisqu'il est de 36% pour l'orge et de 23% pour le cresson (mais avec un écart type très important). La croissance reste cependant très faible, les pourcentages d'inhibition sont en effet équivalents aux autres mélanges et de l'ordre de 70% pour l'orge et 80% pour le cresson.

Le seuil de toxicité biologique pour la germination et la croissance de l'orge et du cresson est fixé à 25%. Ainsi, tous les mélanges présentent une toxicité avérée sur la germination et la croissance de ces 2 végétaux hormis le mélange TA/BE/DV sur la germination du cresson.

L'absence ou le retard de germination peuvent avoir plusieurs explications. En premier lieu, la structure des mélanges drainant et structurant (BA/SP, TA/BA/BS et TA/BE/DV) ne permet pas aux graines d'être dans de bonnes conditions de germination. En effet, les graines sont généralement semées sur une surface plane, en contact avec le substrat afin de rester humides et à une certaine profondeur. La Figure 67 présente les mélanges après semis et on observe que les nombreux creux ou gros composants ne permettant aux graines d'être dans un milieu favorisant leur germination.



Figure 67 : Mélanges mis en pot et exemple de semis d'orge avant le lancement de l'essai

Les autres paramètres qui ont une incidence forte sur la germination sont le pH et la conductivité des mélanges. Le pH doit être situé entre 5,5 et 7,5 et une conductivité au-delà de 70 mS/m peut provoquer des problèmes de phytotoxicité. Le
Tableau 56 présente les pH et les conductivités des mélanges.

Tableau 57 : pH et conductivité des mélanges

Mélanges	pH	Conductivité mS/m
TA/CO	8,91	69,4
BR/CO	8,63	242
BA/DR/CO	8,84	82
BA/SP	8,46	29,5
TA/BA/BS	8,48	36,7
TA/BE/DV	8,5	39,4

Ainsi pour les 3 mélanges de croissance (TA/CO, BR/CO, BA/DR/CO) la conductivité est élevée, ce qui a certainement causée l'absence ou le retard de germination ainsi que la faible croissance. Cette conductivité élevée est certainement liée à la présence de compost en forte proportion dans ces 3 mélanges.

Évaluation de l'innocuité vis-à-vis du vers de terre : *Tests d'évitement*

Les résultats sont exprimés en pourcentage d'évitement. Le seuil de significativité biologique pour ce test est indiqué dans la méthode elle-même, il est de 60%.
La Figure 68 présente le pourcentage d'évitement des vers de terre sur chacun des mélanges.

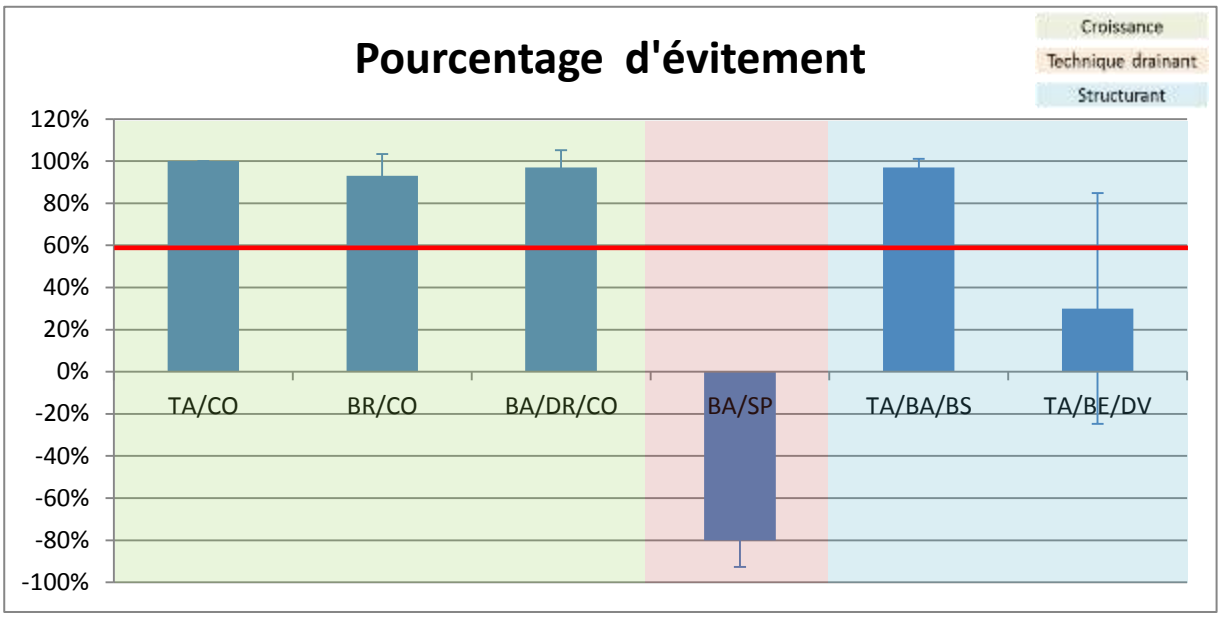


Figure 68 : Pourcentage d'évitement des vers de terre sur les différents mélanges

Dans les mélanges correspondant à l'horizon de croissance, le pourcentage d'évitement est de 100% pour le TA/CO, de 93% pour le BR/CO et de 97% pour le BA/DR/CO. Le mélange structurant TA/BA/BS présente lui aussi un pourcentage d'évitement très élevé de 97%.
Le mélange structurant TA/BE/DV montre un faible taux d'évitement de 30% et le mélange drainant est choisi de préférence au substrat Témoin puisque le pourcentage d'évitement est négatif (-80%).
Le seuil de toxicité biologique est de 60% pour cet indicateur. Seuls les mélanges BA/SP et TA/BE/DV n'entrainent pas de comportement d'évitement pour le vers de terre.

Dans le cas des mélanges de croissance, la conductivité peut être mise en cause car les vers de terre sont sensibles à ce paramètre. Le mélange TA/BA/BS présente également une conductivité plus élevée que les mélanges BA/SP et TA/BE/DV.

Évaluation de l'innocuité vis-à-vis du vers de terre : *Tests de toxicité aiguë*

Dans cet essai, les mélanges ont été testé bruts puis dilués dans un substrat de référence. Les résultats sont donc présentés dans différentes figures. La norme ISO 17616 propose un seuil de significativité biologique à 20%, ce qui signifie que l'effet n'est pas considéré comme significatif s'il est inférieur à cette valeur.

Les résultats de la Figure 69 sont exprimés en pourcentage de mortalité des vers de terre sur les mélanges testés à 100%.

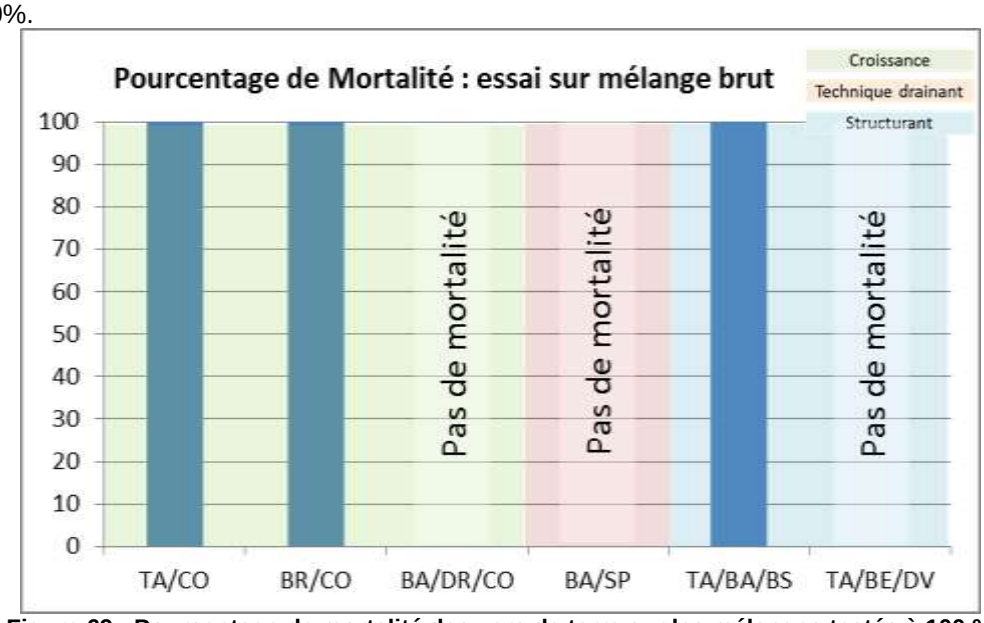


Figure 69 : Pourcentage de mortalité des vers de terre sur les mélanges testés à 100 %

Les mélanges TA/CO, BR/CO et TA/BA/BS ont causé la mortalité de 100% des vers de terre lorsqu'ils sont testés brut (sans dilution). Les mélanges BA/DR/CO, BA/SP et TA/BE/DV n'ont aucun effet létal sur les vers de terre.

Suite à ces résultats, les mélanges ont été dilués dans un sol de référence afin de savoir à partir de quel pourcentage d'apport, la toxicité était observée. Ainsi, les résultats de la Figure 70 sont exprimés en pourcentage de mélange causant 100% de mortalité.
On constate que 60% de mélange TA/CO provoque 100% de mortalité, 50% pour le mélange TA/BA/BS et 40% pour le mélange BR/CO.

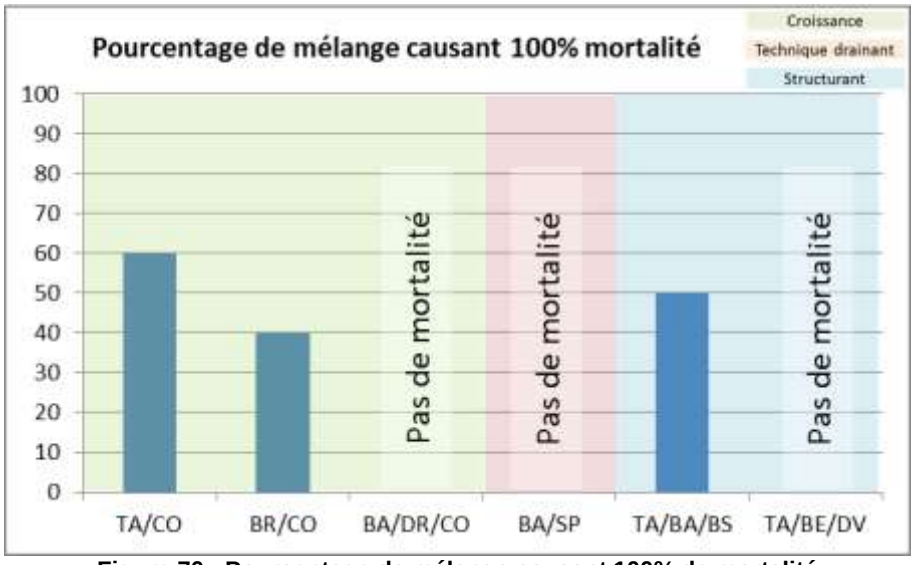


Figure 70 : Pourcentage de mélange causant 100% de mortalité

Et enfin la Figure 71 montre l'évolution de la toxicité en fonction du pourcentage de dilution du mélange dans le substrat de référence (seuls sont figurés les mélanges présentant de la toxicité).

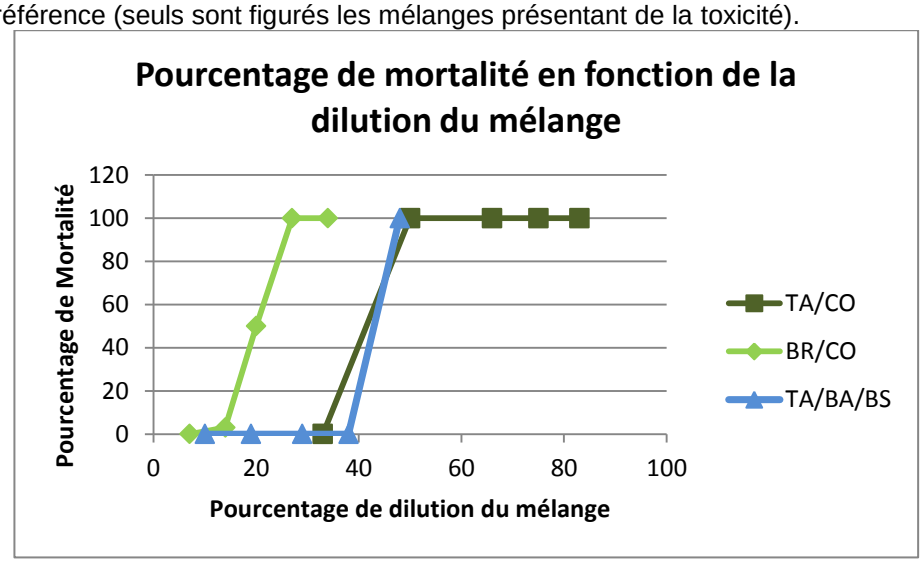


Figure 71 : Pourcentage de mortalité en fonction de la dilution du mélange dans un substrat artificiel

On observe que le mélange BR/CO est le plus toxique. En effet, dès qu'il est apporté dans une proportion de 20% dans le substrat témoin, il entraine déjà 50% de mortalité. Ceci pourrait s'expliquer en partie par sa forte conductivité (242 mS/m). Le mélange TA/CO présente lui le pH le plus élevé (8,91). Par contre, ni le pH ni la conductivité ne peuvent expliquer la forte toxicité du mélange TA/BA/BS vis-à-vis des vers de terre.

Conclusion sur l'innocuité des mélanges vis-à-vis des organismes terrestres

La totalité des mélanges ont un effet toxique sur la germination des graines d'orge et de cresson, ne permettant pas dans le cadre de l'essai (c'est-à-dire après 21 jours de contact) d'obtenir des plantules équivalentes en nombre et en masse à celles qui ont été cultivées sur le sol témoin. Les textures et structures des mélanges pourraient en partie expliquer cette observation. Ainsi, le mélange de ballast et de boue de papeterie (BA/SP) ou celui de terre, de ballast et de boue de STEP (TA/BA/BS) ne permettent pas

aux graines d'être dans de bonnes conditions pour germer (manque de contact avec la matière et donc assèchement de surface) comme le montre la Figure 67. Cependant, certains mélanges, comme celui de terre acide et de compost (TA/CO), qui ne présentaient pas lors de la mise en pot de conditions défavorables pour la germination, n'ont pas permis une bonne croissance des plantes comme le montre la Figure 72.

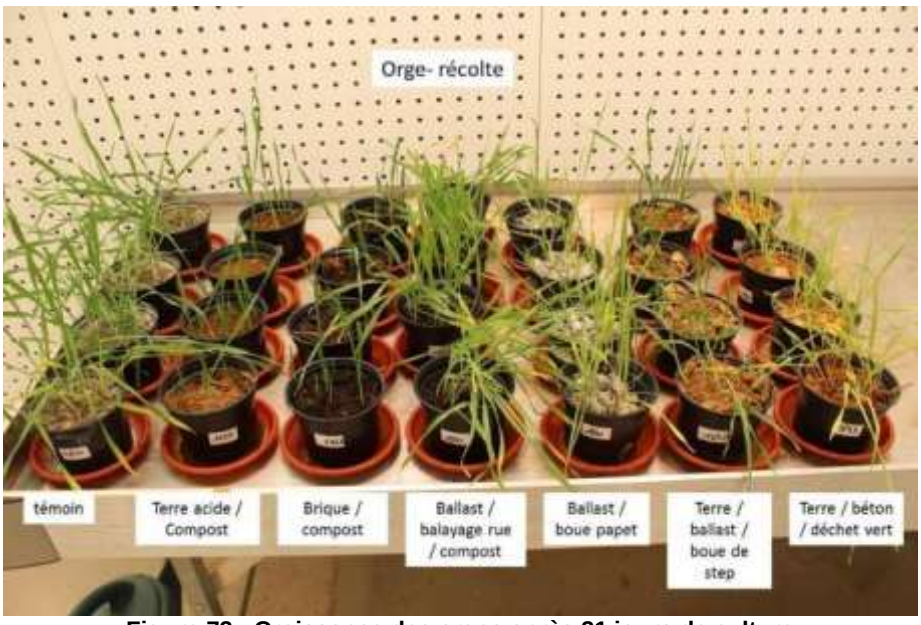


Figure 72 : Croissance des orges après 21 jours de culture

Les effets toxiques observés chez les vers de terre ne concernent pas les mêmes mélanges et sont, de façon générale, moins importants. Certains mélanges ne provoquent aucun effet (ex : BA/SP ou dans une moindre mesure : TA/BE/DV). La Figure 73 présente l'ensemble des résultats obtenus sur les indicateurs terrestres. La ligne rouge représente les seuils de significativité biologique pour chaque test réalisé. Ainsi, si la surface orange se situe à l'intérieur du périmètre rouge cela signifie qu'aucun effet ne peut être considéré comme significatif. A l'inverse, si la surface orange est plus importante que le périmètre rouge, cela indique que le mélange entraine une toxicité vis à vis des indicateurs.
Il apparait alors que le mélange TA/BE/DV est celui qui présente la meilleure innocuité vis-à-vis des bioindicateurs testés à l'inverse des mélanges TA/CO et BR/CO qui entrainent le plus d'effets toxiques. Ces effets pourraient être mis en relation avec les fortes teneurs en compost de ces mélanges, entrainant une salinité importante perturbant les organismes. Il faut noter que ces deux mélanges ont été fabriqués afin de répondre à un objectif de croissance des plantes. D'autre part, les vers de terre utilisés, *Eisenia foetida*, sont des vers épigés, vivant donc aussi dans ces horizons de croissance afin d'y dégrader la matière organique or les résultats indiquent qu'ils évitent très fortement les mélanges.

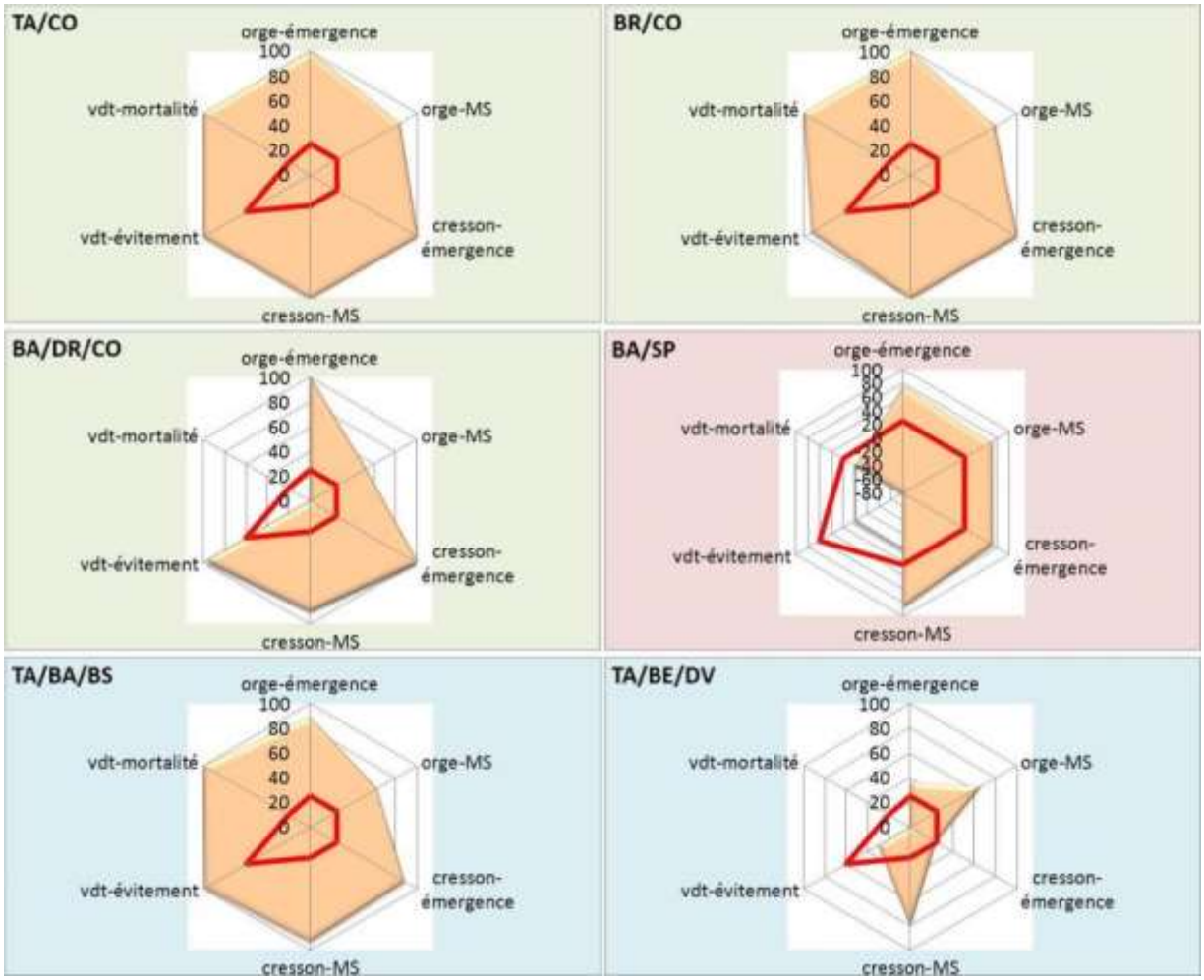


Figure 73 : Résultats d'écotoxicité obtenus sur les indicateurs terrestres
(NB. Les résultats sont exprimés en % d'inhibition/témoin. La ligne rouge correspond aux seuils de significativité biologique de chaque indicateur)

V.4.c. Résultats des essais sur les organismes aquatiques

L'innocuité de l'ensemble des lixiviats des matériaux a été évaluée sur une algue unicellulaire, une lentille d'eau et une daphnie.

Les bioindicateurs exposés sont les suivants :

- Algue unicellulaire et lentille d'eau (végétaux, producteurs primaires)
- Daphnie (invertébrés, consommateurs primaires)

Évaluation de l'innocuité vis-à-vis d'algues : *Tests d'inhibition de la* croissance *Pseudokirchneriella subcapitata*

Les résultats sont exprimés en pourcentage d'inhibition par rapport à la modalité témoin (solution nutritive seule).
La Figure 74 et la Figure 75 présentent les résultats obtenus sur *Pseudokirchneriella subcapitata*, une algue d'eau douce pélagique, c'est-à-dire vivant dans la colonne d'eau.
Les auteurs d'une étude ADEME[2] sur l'écotoxicité de matières fertilisantes proposent un seuil de significativité biologique à 15%, ce qui signifie que l'effet n'est pas considéré comme significatif s'il est inférieur à cette valeur.
Les résultats montrent une toxicité significative pour trois des six mélanges. On peut cependant noter que cette toxicité est, pour 2 des trois mélanges, inférieure à 20% qui est le seuil de significativité biologique proposé par la norme ISO 17616. Cela signifie donc que pour ces deux mélanges (TA/CO et BR/CO), leur toxicité pourrait être considérée comme faible. Ainsi, seul l'extrait réalisé à partir du ballast et du sous-produit papetiers (BA/SP) entrainerait une toxicité significative vis-à-vis des algues.

[2] *Charissou AM ; Pandard P.,Cossu-Leguille C., Chenon P, Nassr N (2012) Développement d'un protocole d'évaluation de l'écotoxicité des matières fertilisantes organiques utilisées en fertilisation agricole, Convention ADEME n°09-75-C0061,*

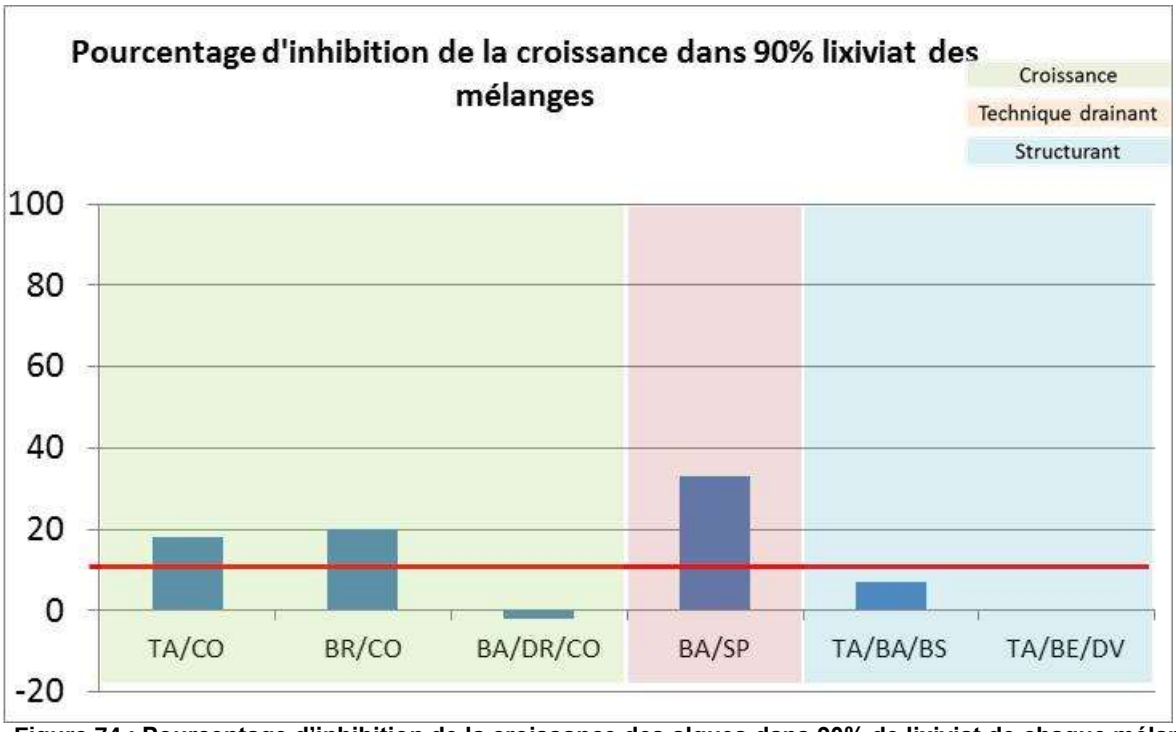


Figure 74 : Pourcentage d'inhibition de la croissance des algues dans 90% de lixiviat de chaque mélange testé

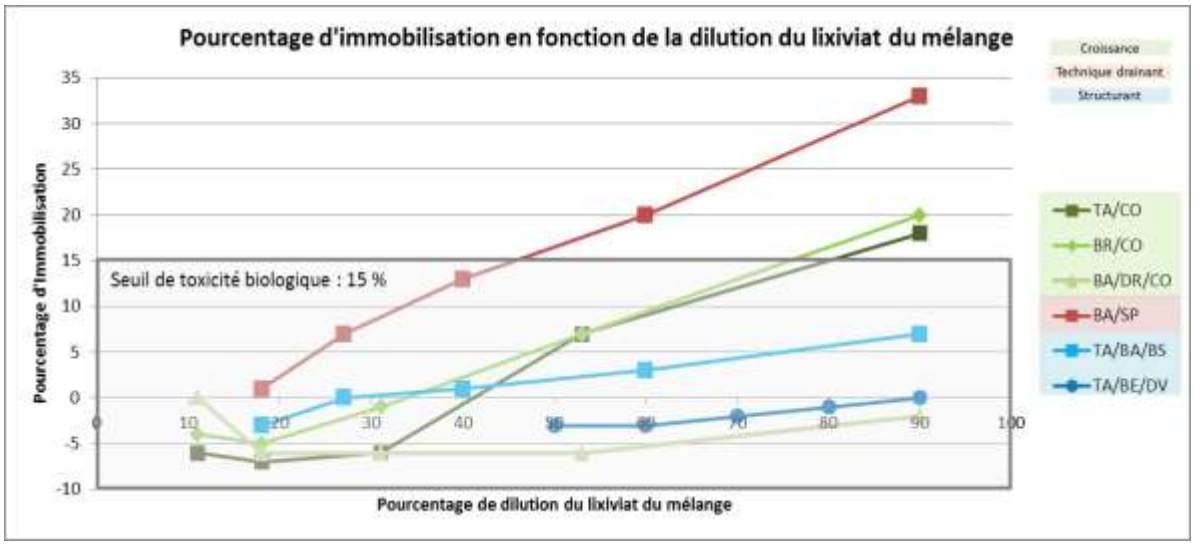


Figure 75 : Pourcentage d'inhibition de la croissance des algues en fonction de la dilution du lixiviat des mélanges

Évaluation de l'innocuité vis-à-vis de végétaux : *Tests de phytotoxicité Lemna minor*

Les résultats sont exprimés en pourcentage d'inhibition par rapport à la modalité témoin (solution nutritive seule).

La Figure 76 et la Figure 77 présentent les résultats obtenus sur, respectivement, le nombre et la surface des frondes après 7 jours de contact. *Lemna minor* est un végétal d'eau douce vivant en surface. La norme ISO 17616 propose un seuil de significativité biologique à 25%, ce qui signifie que l'effet n'est pas considéré comme significatif s'il est inférieur à cette valeur. Les résultats montrent que l'ensemble des extraits aqueux testés n'ont pas d'effet toxique sur les lentilles d'eau. Certains extraits semblent même stimuler leur croissance en augmentant le nombre de frondes (sans pour autant augmenter la production de MS).

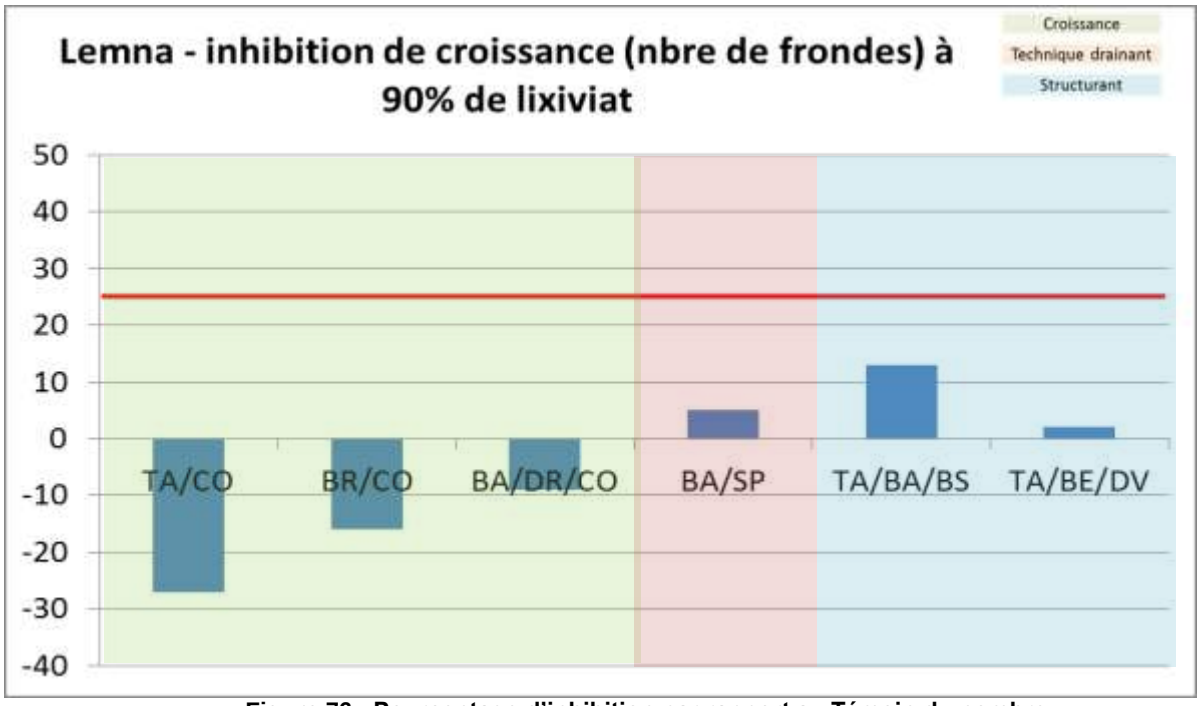


Figure 76 : Pourcentage d'inhibition par rapport au Témoin du nombre de frondes au terme de 7 jours de croissance

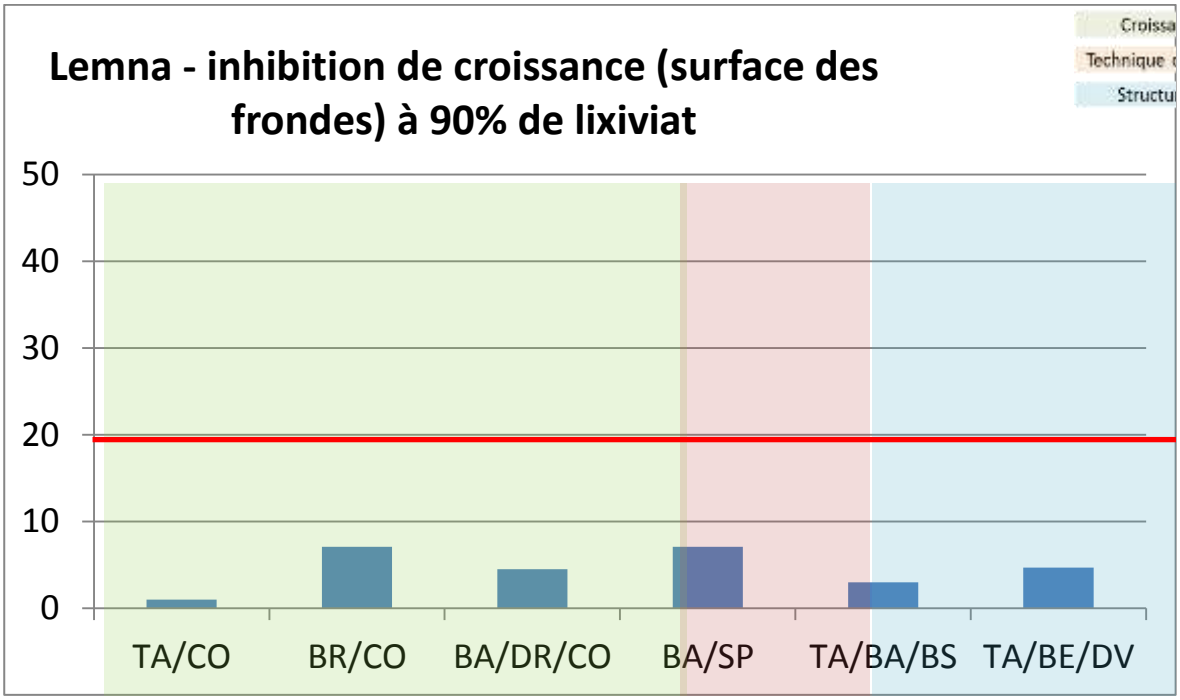


Figure 77 : Pourcentage d'inhibition par rapport au Témoin de la surface des frondes au terme de 7 jours de croissance

Évaluation de l'innocuité vis-à-vis de microcrustacé : *Tests de toxicité aiguë Daphnia magna*

Les résultats sont exprimés en pourcentage d'inhibition par rapport à la modalité témoin (solution nutritive seule). *Daphnia magna* est un microcrustacé pélagique, c'est-à-dire vivant dans la colonne d'eau.

La Figure 78 et la Figure 79 présentent les résultats obtenus sur les daphnies. La norme ISO 17616 propose un seuil de significativité biologique à 20%, ce qui signifie que l'effet n'est pas considéré comme significatif s'il est inférieur à cette valeur.
Les résultats montrent que la majorité des extraits aqueux testés n'ont pas d'effet toxique sur les daphnies. Seuls les extraits réalisés à partir des mélanges de terre acide + compost (TA/CO) et de briques + compost (BR/CO) entrainent une mortalité significative de ces bioindicateurs d'eau douce. Le mélange BR/CO

présentant la toxicité la plus importante, le seuil de significativité étant atteint dès que cet extrait aqueux est apporté à plus de 30% dans un milieu de référence (solution nutritive) (Figure 79).

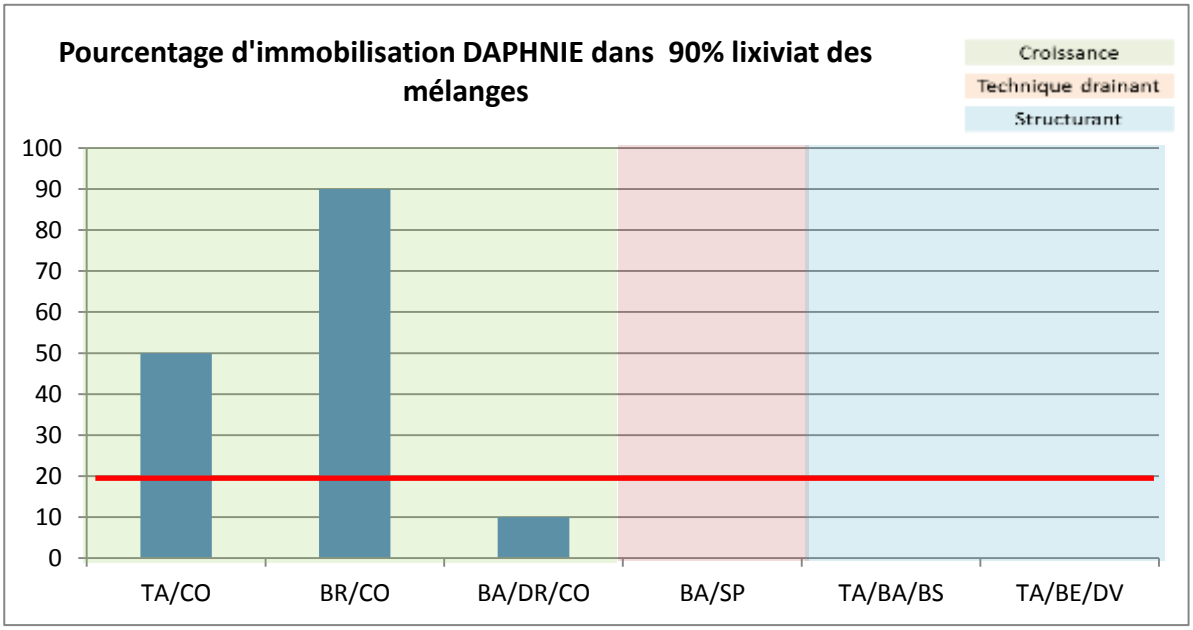


Figure 78 : Pourcentage d'immobilisation des Daphnies dans 90% de lixiviat de chaque mélange testé

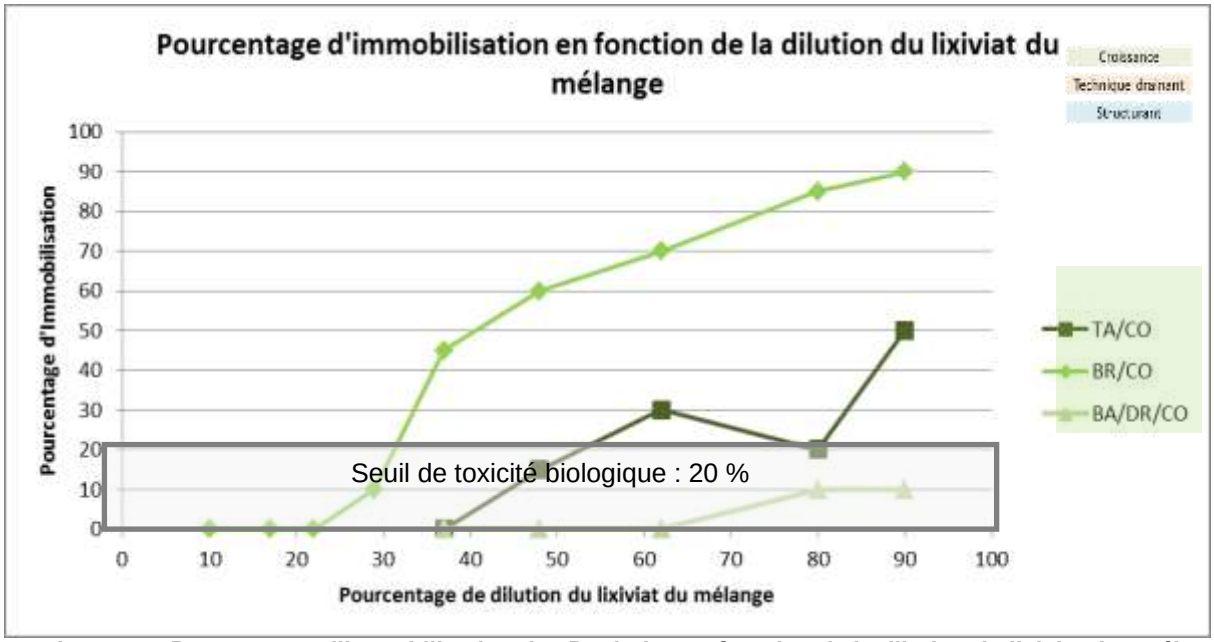


Figure 79 : Pourcentage d'immobilisation des Daphnies en fonction de la dilution du lixiviat des mélanges

Conclusion sur l'innocuité des mélanges vis-à-vis des bioindicateurs aquatiques

La Figure 80 présente l'ensemble des résultats obtenus sur les indicateurs aquatiques. Il apparait que les mélanges TA/CO et BR/CO sont les seuls qui présentent une toxicité vis-à-vis des bioindicateurs algues et daphnies. Cependant, comme nous l'avons précisé précédemment, ces niveaux de toxicité restent relativement faibles. Compte tenu de ces résultats, les risques pour l'écosystème aquatique seraient donc acceptables.

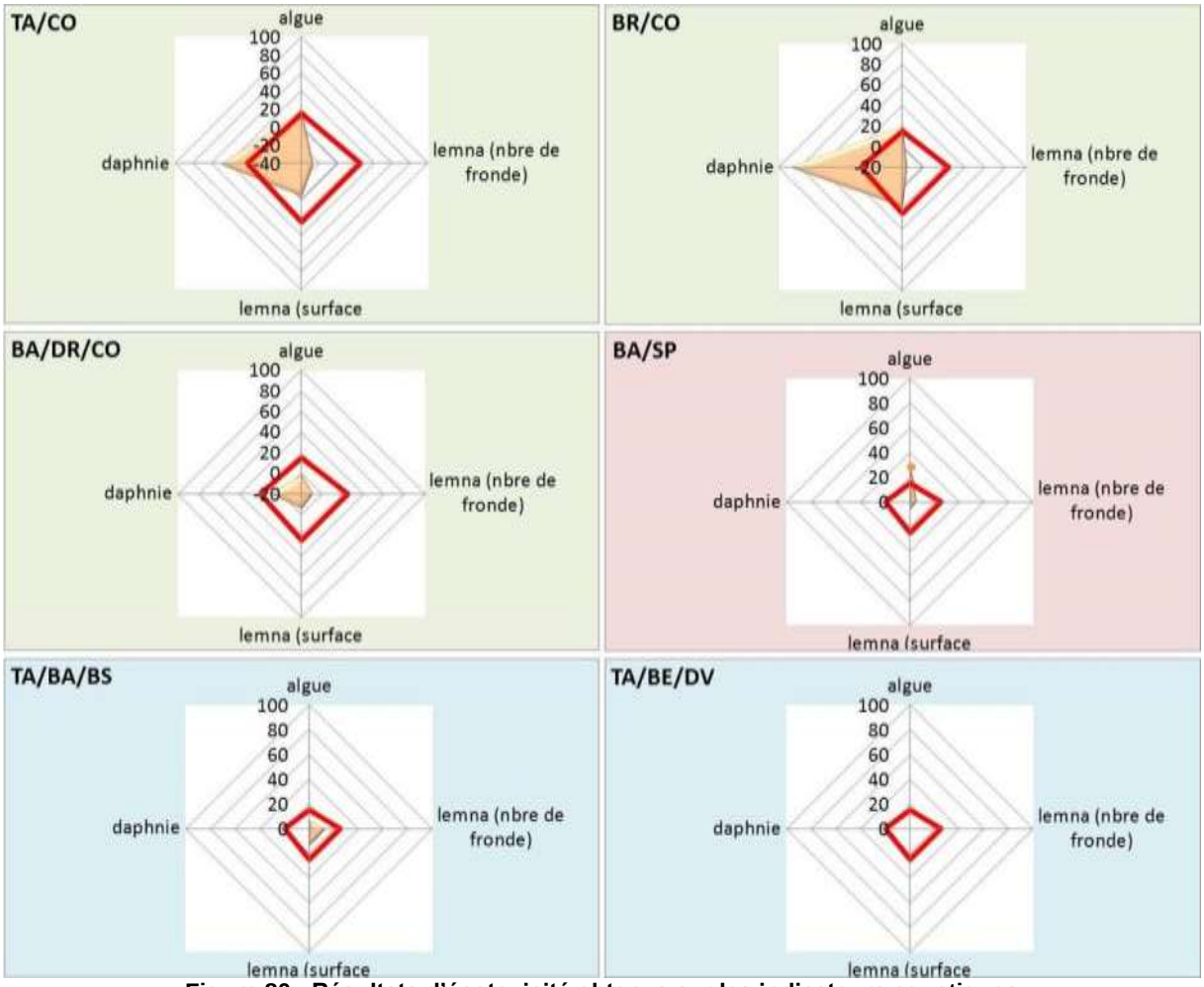


Figure 80 : Résultats d'écotoxicité obtenus sur les indicateurs aquatiques

(NB. Les résultats présentés concernent l'extrait aqueux le plus concentré et sont exprimés en % d'inhibition/témoin. La ligne rouge correspond aux seuils de significativité biologique de chaque indicateur)

V.4.d. Résultats des essais de génotoxicité

Évaluation de l'innocuité vis-à-vis d'un végétal : Tests de génotoxicité *Vicia faba* (milieu solide)

Cet essai nécessite d'exposer pendant 72h trois graines pré-germées de fève dans chaque milieu à tester. L'effet génotoxique est ensuite observé dans les racines secondaires qui se sont développées dans le milieu testé.

Il s'avère que certains des mélanges n'ont pas permis aux racines secondaires de se développer, il n'est donc pas possible pour ces mélanges (BR/CO et TA/BA/BS) d'évaluer leur potentiel de génotoxicité. D'autre part, dans certains mélanges, toutes les graines n'ont pas pu être prises en compte : seules les racines de l'une des trois graines ont pu être observées pour le mélange BA/DR/CO et seules les racines de deux des trois graines ont pu être observées pour le mélange BA/SP.

Sur les racines qui ont pu être observé, aucun effet toxique sur la multiplication cellulaire (mitose) n'a été constaté (Figure 81).

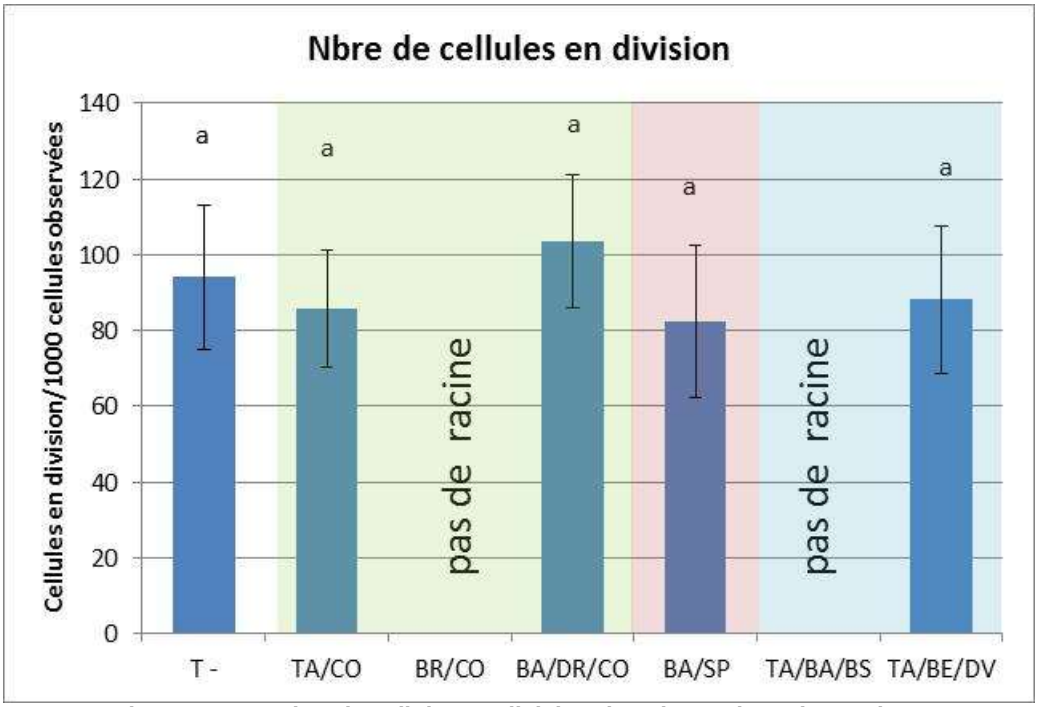


Figure 81 : nombre de cellules en division dans les racines des graines de fèves exposées aux différents mélanges

L'étude de l'ensemble des racines qui ont été observées montre qu'aucun des mélanges n'induit de génotoxicité sur la fève. Cependant, dans le mélange BA/SP des micronoyaux ont été observés sur 2 des 3 graines exposées; mais l'analyse statistique n'indique pas que cette génotoxicité soit significative. Ces résultats demanderaient donc à être confirmés.

Évaluation de l'innocuité vis-à-vis d'un végétal : Tests de génotoxicité *Vicia faba* (milieu liquide)

Toutes les graines pré-germées qui ont été mises au contact des extraits aqueux des mélanges ont développées des racines secondaires observables au microscope. Contrairement à l'essai précédent, les racines de tous les mélanges ont des taux de division cellulaire significativement inférieurs à celui de la modalité témoin (ANOVA, test des étendues multiples) (Figure 82) mettant ainsi en évidence un effet négatif sur la croissance de ces racines. Les valeurs restent cependant dans une gamme « normale » indiquant que le développement est suffisant pour permettre l'évaluation de la génotoxicité via le comptage des micronoyaux.

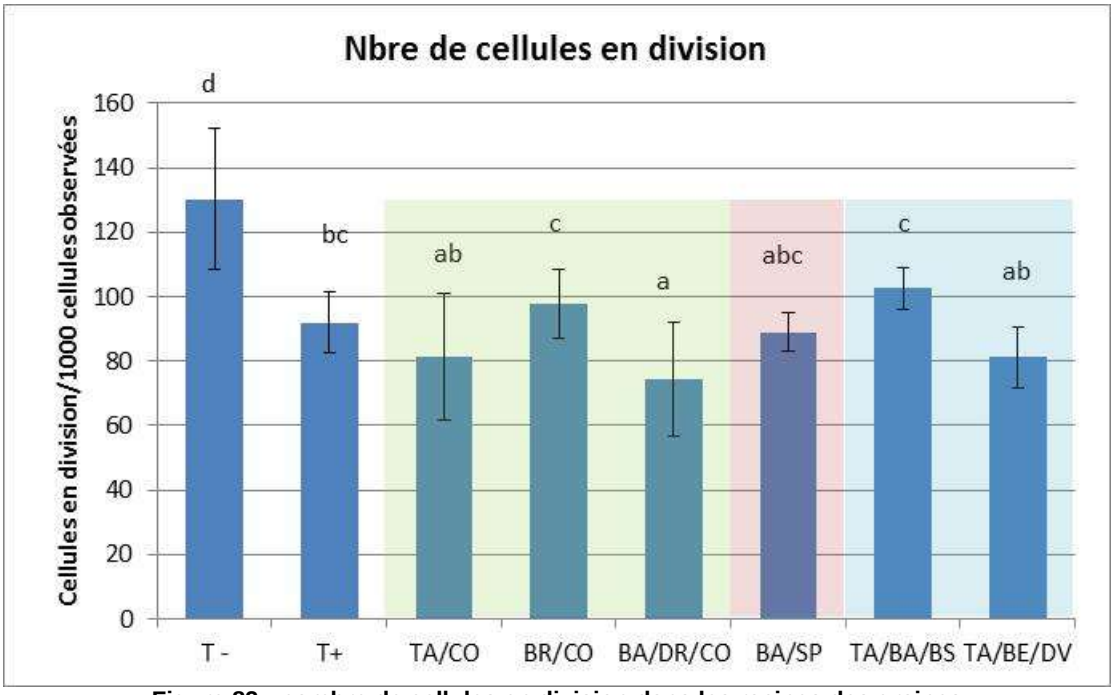


Figure 82 : nombre de cellules en division dans les racines des graines de fèves exposées aux lixiviats des différents mélanges

Aucun effet génotoxicité n'a été mis en évidence, quel que soit le lixiviat du mélange testé (résultats non figurés).

V.4.e. Conclusion sur l'écotoxicité des mélanges étudiés

La Figure 83 présente les résultats obtenus sur les différents bioindicateurs exposés. Le quart « nord-est » des radars est représenté par les indicateurs aquatiques, et le reste par les indicateurs terrestres.
Les résultats montrent que les mélanges entrainant les effets toxiques les plus importants et sur le plus grand nombre de bioindicateurs sont TA/CO, BR/CO et TA/BA/BS.

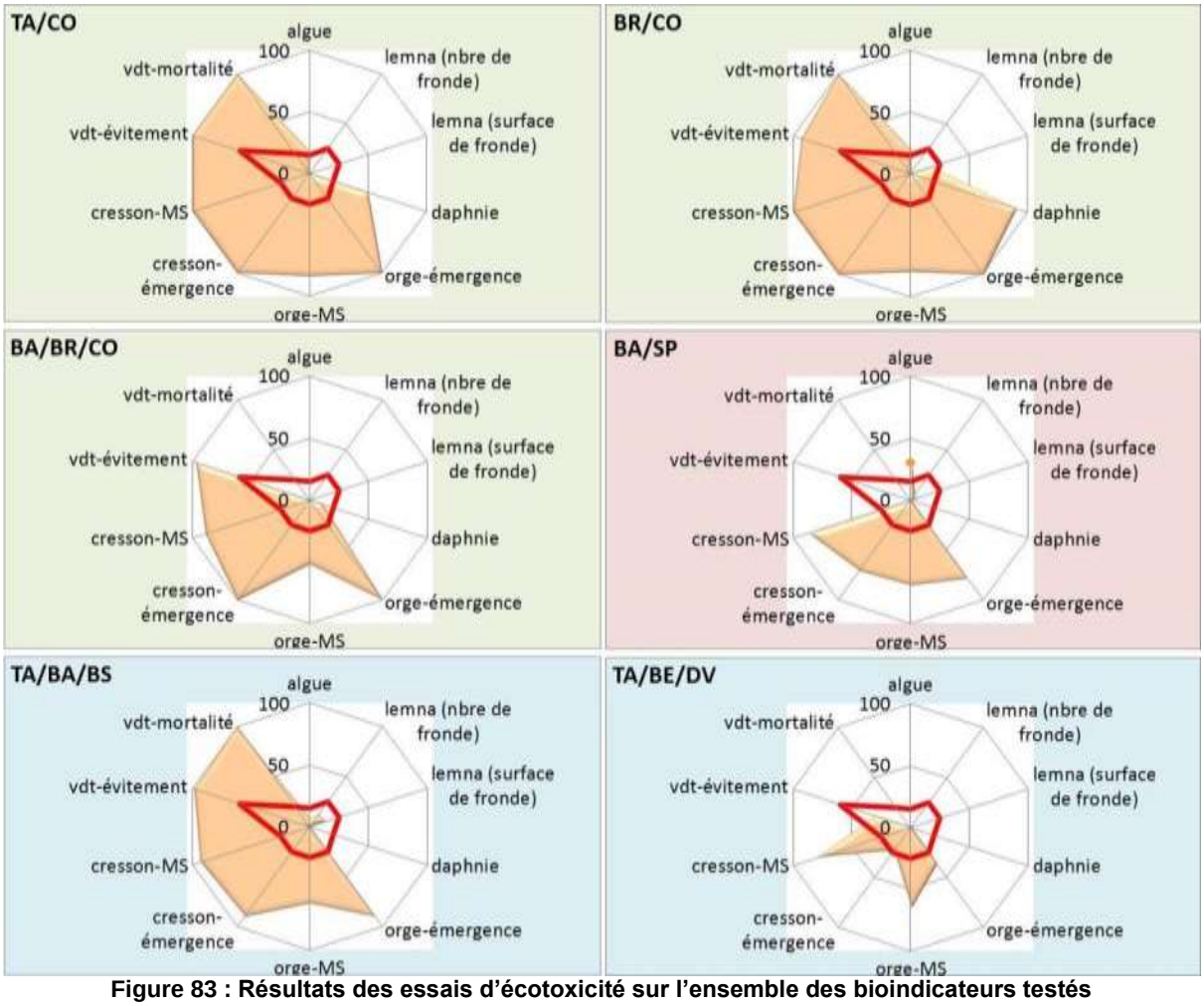


Figure 83 : Résultats des essais d'écotoxicité sur l'ensemble des bioindicateurs testés
(NB. Pour faciliter la comparaison, les valeurs négatives ne sont pas présentées.
La ligne rouge correspond aux seuils de significativité biologique de chaque indicateur)

Différentes hypothèses peuvent être émises pour expliquer cette toxicité.
Le mélange BR/CO présente une très forte conductivité électrique de 242 mS/m qui ne permet pas aux graines de germer et donc d'obtenir des plantules en fin d'essai. Cette forte conductivité a pour origine la forte proportion de compost dans le mélange et le faible pouvoir tampon des briques (Tableau 57).

Tableau 58 : Composition des 6 mélanges testés (en % massique ou volumique, humide)

Type de mélange	% massique	% volumique
Mélanges de croissance		
– TA/CO	75%-25%	50% - 50%
– BR/CO	50%-50%	33% - 66%
– BA/DR/CO	30%-40%-30%	13% - 42% - 45%
Mélange technique-drainant		
– BA/SP	56%-44%	33% - 66%
Mélange squelette-structurant		
– TA/BA/BS	21%-74%-5%	20% - 60% - 20%
– TA/BE/DV	34%-63%-3%	30% - 60% - 10%

D'autre part, le Tableau 58 montre que les teneurs dans les mélanges de la quasi-totalité des éléments sont supérieures aux PNECs (concentrations prédictives sans effet sur l'environnement) définies par l'INERIS (organisme français chargé d'établir ces valeurs pour la France). Ainsi, si l'on considère que ces mélanges sont utilisés bruts et donc que les organismes sont exposés à la totalité des mélanges, on peut conclure que, d'un point de vue purement analytique, le risque est considéré comme inacceptable pour la totalité des éléments du tableau (excepté bien évidement pour les éléments dont l'INERIS ne donne pas de recommandation de PNEC).

Tableau 59 : Teneurs en éléments métalliques dans les mélanges (fraction inférieure à 2 mm), et comparaison avec les PNEC (predictive no effect concentration, ou concentration prédictive sans effet) - source PNEC : INERIS

ETMs sur solide (<2mm) mg/kg matière sèche							PNEC INERIS
As	15,0	25,0	15,0	4,0	15,0	12,0	1,8
Ba	475,0	327,0	288,0	70,0	339,0	503,0	pas de donnée
Cd	0,2	0,5	0,3	0,2	0,2	<0.1	pas de valeur pour le sol
Cr	48,0	40,0	56,0	40,0	79,0	50,0	3,2 (Cr III)
Cu	44,0	134,0	124,0	77,0	63,0	35,0	2,7
Hg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Mo	1,4	4,2	3,7	1,6	2,3	0,9	pas de donnée
Ni	17,0	19,0	24,0	16,0	26,0	18,0	pas de valeur pour le sol
Pb	24,0	46,0	40,0	17,0	18,0	20,0	12
Sb	3,9	7,0	15,0	2,5	4,2	2,1	
Se	<1	<1	<1	<1	<1	<1	0,0925
Sn	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Zn	112,0	319,0	257,0	54,0	119,0	59,0	26
somme	**740,5**	**921,7**	**823,0**	**282,3**	**665,7**	**700,0**	

Cette même comparaison (teneur/PNEC) a été réalisée sur les résultats des essais de percolation. La comparaison est moins aisée car les organismes aquatiques ne sont pas directement exposés aux éluâts obtenus par les essais. En effet, les éléments qui vont percoler à partir des mélanges dans les eaux vont se trouver dilués dans la nappe ou la rivière considérée. Ce taux de dilution peut être calculé dans le cadre d'un schéma conceptuel qui prend en compte les caractéristiques de l'environnement (porosité du sol, présence de couche imperméable, vitesse d'écoulement de la nappe, débit de la rivière, distance entre la source et la cible rivière, etc.). Cependant, compte tenu des résultats obtenus lors de ces essais de percolation, il apparait que certains mélanges sont particulièrement concentrés en aluminium (par ordre décroissant : BA/DR/CO, TA/CO et BR/CO) et en magnésium (par ordre décroissant BR/CO, TA/CO et BA/DR/CO). Ainsi, afin que le risque soit considéré comme acceptable pour l'écosystème aquatique, il faudrait que l'aluminium et le magnésium qui percolent de ces mélanges soient dilués, selon les cas, entre 10 000 fois et 3 600 fois. Les quantités de polluants apportées sont bien évidement à moduler en fonction des quantités de sol artificiel qui sera apporté. Ainsi, pour un « trou d'arbre » les quantités seront très faibles et pour des parcs, elles peuvent être particulièrement importantes.

Ces fortes concentrations pourraient permettre d'expliquer certains résultats d'écotoxicité (attention, les essais d'écotoxicité n'ont pas été réalisés à partir des percolats obtenus lors des essais de percolations dont les résultats sont commentés ci-dessus mais à partir d'une autre méthode d'extraction, dont le ratio liquide/solide diffère et qui, théoriquement, extrait moins d'éléments). D'autre part, ces résultats confirment ceux obtenus sur les matériaux. En effet, les essais d'écotoxicité terrestres avaient mis en évidence des effets toxiques sur les plantes dès un apport de 12,5% (en volume) et sur les vers de terre dès 50% de compost de boue, or les mélanges BR/CO, TA/CO et BA/DR/CO contiennent respectivement 66%, 50% et 45% de compost. De même la boue de station d'épuration (BS) avait montré une forte toxicité vis-à-vis des plantes dès 12,5% et des vers de terre dès 25%. Ces résultats sont confirmés dans le mélange TA/BA/BS qui contient 20% de boue avec des effets toxiques sur les plantes et les vers de terre. La présence des autres matériaux ne semble donc pas réduire la toxicité observée initialement.

V.4.f. Evaluation des agents pathogènes

Les résultats des différentes analyses sont présentés dans le tableau ci-après.
Dans le cadre réglementaire actuel, sans référentiel pour la construction de sol, il n'est pas possible d'acter une évaluation précise du risque lié aux agents pathogènes.
Selon une lecture propre aux supports de culture, la norme NF U 44‑551 exige que seules les salmonelles soient recherchées, si le support n'est pas utilisé pour des cultures à consommer crues. La valeur limite est une absence de salmonelles pour 1 g d'échantillon. Dans le cadre de cette étude, aucun mélange ne présente de salmonelles.

Tableau 60 : Résultats des analyses en agents pathogènes des mélanges

		6	7	8	9	10	11		
	unité / Réf.	Terre acide/Compost 70/30	Brique/Compost 50/50	Ballast/Déchets de rues/Compost 30/40/30	Ballast/Résidus de papeterie 60/40	Terre acide/Ballast/Boues d'épuration 20/75/5	Terre acide/Béton/Déchets verts 30/65/5	Min	Max
Microorganismes à 30°C	par g	9,80E+07	1,20E+08	1,80E+08	1,20E+07	6,20E+07	9,40E+07	1,20E+07	1,80E+08
Levures et moisissures	par g	2,80E+05	9,10E+05	2,40E+04	4,20E+05	2,30E+05	2,40E+04	2,40E+04	9,10E+05
E. coli sur TBX	par g	< 400	< 100	< 1000	< 100	< 100	< 4000	< 100	< 4000
Aspergillus	par g	< 10000	< 10000	< 1000	< 10000	< 10000	< 1000	< 1000	< 10000
Staphylocoques à coagulase	par g	< 1000	< 1000	< 1000	< 10	< 1000	< 1000	< 10	< 1000
Entérocoques fécaux NPP	NPP par g	2873	8790	23920	556	205	4669	205	23920
Clostridium perfringens(végétative)	par g	< 10	< 10	2000	2900	580	90 estimé	< 10	2900
Clostridium perfringens(spores)	par g	< 10	< 10	650	< 40	180	< 10	< 10	650
Salmonelles	dans 25 g	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
Listeria monocytogenes	dans 25 g	Absence	Absence	Présence	Absence	Absence	Absence	Absence	Présence
Larves de nématodes	dans 25 g	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
Œufs de nématodes	dans 25 g	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence

VI. Evolution des Technosols construits (=Tâche 4)

VI.1. Evolution des matériaux en mélange en conditions contrôlées

Le choix des 6 mélanges modèles a été réalisé par (i) la hiérarchisation, en fonction des objectifs de propriétés mécaniques, physiques, chimiques et biologiques à atteindre pour chaque horizon, d'un grand nombre de mélanges (749) dont les propriétés ont été prédites ou mesurées lors de l'étape décrite précédemment et (ii) un classement complémentaire, à dire d'experts, des mélanges par les partenaires du projet SITERRE.

VI.1.a. Processus d'agrégation : caractérisation des agrégats

Afin de mesurer la stabilité des agrégats en conditions de laboratoire, nous avons broyé et tamisé les matériaux minéraux et organiques à 2 mm afin d'augmenter les surfaces de contact entre les particules. Les facteurs d'agrégation testés ont été (i) la nature de la matière organique (compost de boue de step ou déchet vert brut), (ii) la nature de la matière minérale (déchet de briques ou terre excavée), (iii) les alternances de cycles d'humectation-dessiccation, (iv) le facteur biologique (végétation), et (v) le temps de formation (Rokia, 2014). Nous présentons ici une synthèse des principaux résultats obtenus en conditions contrôlées avant de présenter les résultats obtenus en conditions naturelles dans les lysimètres.

Effet des facteurs d'alternance de cycles d'humectation-dessiccation, de la nature de la matière organique et de la nature de la matière minérale sur le processus d'agrégation.

Les mélanges étudiés, sans effet de la végétation, étaient placés en conditions contrôlées à 28°C pendant 56 jours et ont subi 8 cycles d'humectation-dessiccation (réhumectation à 80% de la capacité au champ mesurée à – 10 kPa) :

- terre excavée acide (TA) mélangée avec 25 % en masse de compost de boue de station d'épuration (CO) ou 25 % en masse de déchet vert (DV),
- brique (BR) mélangée avec 50% en masse de compost de boue de station d'épuration (CO) ou 50 % en masse de déchet vert (DV).

Les résultats obtenus ont montré qu'il n'a pas été possible de fabriquer des agrégats avec la brique. Seule la terre acide en mélange avec du déchet vert (TA/DV) a permis de fabriquer des agrégats supérieurs à 3,15 mm et dont la stabilité augmente au cours du temps pour devenir moyennement stables après 8 cycles d'humectation-dessiccation (C8, Figure 85). L'alternance de cycles d'humectation-dessiccation a un effet significatif sur les valeurs de diamètre moyen pondéré (Mean weight diameter, MWD) (1,2 mm) au bout de 56 jours par rapport au mélange TA/DV resté toujours humide (1 mm). Le mélange TA/CO a permis la formation d'agrégats > 3,15 mm mais qui restent peu stables tout au long de l'essai (0,4 mm) (Figure 84 & Figure 85).

Les mélanges	Cycle 1	Cycle 4	Cycle 8
M1 TA/DV			
M2 TA/CO			

Figure 84. Image à la loupe binoculaire (×1.2) d'agrégats des mélanges M1 TA/DV et M2 TA/CO

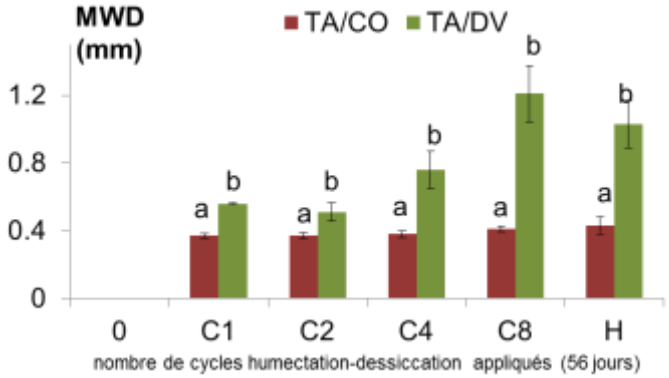


Figure 85. Valeurs de MWD mesurées avec le test de réhumectation lente sur les agrégats de TA/CO et TA/DV en fonction du nombre de cycles d'humectation dessiccation appliqués. Comparaison avec des mélanges à humidité constante (H) durant les 56 jours (Rokia et al., 2014)

La nature de la matière organique a eu un effet sur la structuration du mélange. Des mesures de biomasse microbienne dans les différents traitements ont montré que la biomasse microbienne contenue initialement dans les mélanges de terre acide était variable : 0,2 g kg^{-1} de sol sec pour TA/CO et 1,1 g kg^{-1} de sol sec pour TA/DV. Dans le mélange TA/CO cette valeur restait constante (0,2 g kg^{-1} de sol sec) et faible au cours du temps. En effet les teneurs moyennes mesurées en sol cultivé sont de 1,6 g kg-1 de sol sec de biomasse microbienne (Abiven *et al.*, 2007). Dans le mélange TA/DV, la biomasse microbienne a augmenté au cours des 56 jours passant de 1,1 à 2,7 g kg^{-1} de sol sec. Des images réalisées au microscope électronique à transmission (MET) et couplé avec l'analyse EDX ont permis une étude morpho-analytique de la nature des biomasses des matières organiques (Figure 86). Les images du compost montraient que les matières organiques étaient très transformées avec des résidus foliaires sous forme de plastes. La biomasse microbienne était constituée principalement de spores de bactérie à l'état latent qui indiquaient un compostage évolué du produit. Les micro-analyses élémentaires (MET-EDX) ont révélé que N et P étaient liées aux matières organiques stables et aux résidus microbiens et ainsi peu disponibles pour les plantes ou l'activité microbienne. Pour le déchet vert, on observe la présence de nombreuses bactéries et champignons vivants et actifs qui sont en train de dégrader les résidus ligneux et foliaires. Les micro-analyses élémentaires ont montré que N et P sont situés dans les parois et contenus cellulaires en cours de dégradation. Ces deux éléments sont donc rapidement disponibles pour les plantes et favorisent l'activité des micro-organismes.

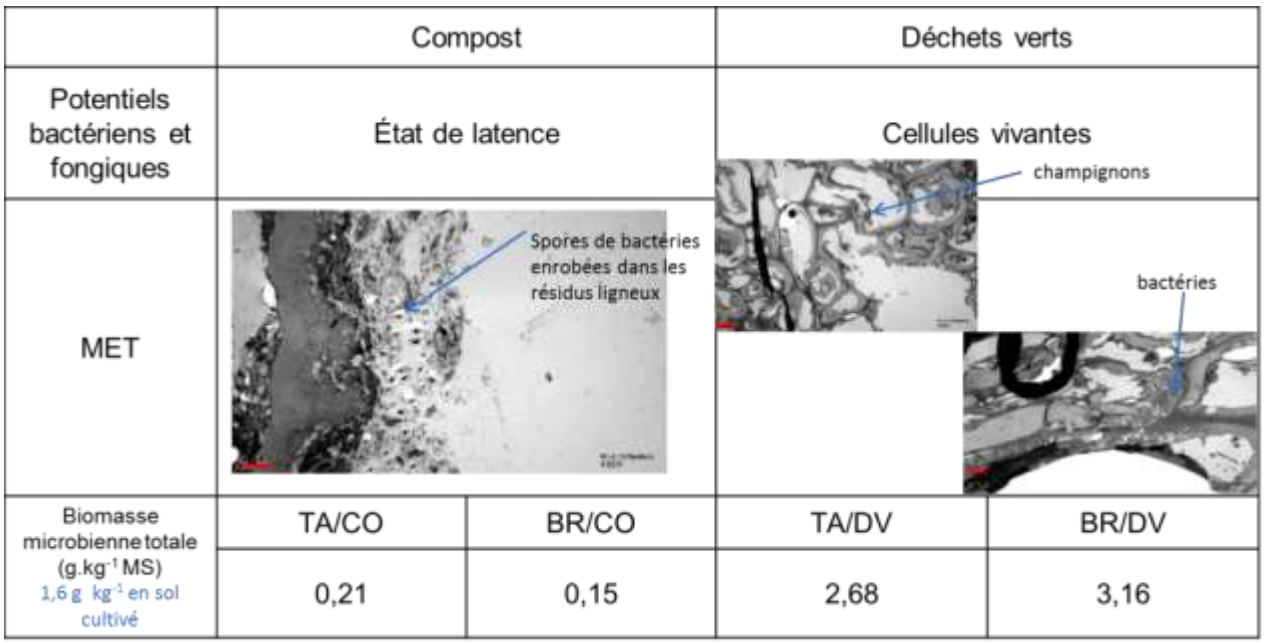


Figure 86. Forme et nature de la biomasse microbienne après 56 jours d'essai dans le compost de boues et les déchets verts (Image réalisée au MET par la société Microhumus, d'après Rokia, 2014)

Dans les mélanges avec les briques, les mesures de la biomasse microbienne étaient faibles avec le compost et diminuaient au cours du temps de 0,4 à 0,1 g kg^{-1}. Dans le mélange avec déchet vert (BR/DV) la valeur de biomasse était élevée (3,2 g kg^{-1}) et restait constante au cours du temps. L'activité des micro-organismes était inexistante puisqu'il n'y a pas eu de formation d'agrégats bien que la biomasse microbienne soit très élevée. On peut penser que la nature de la matière minérale joue aussi un rôle important dans l'agrégation des matières en mélange. Des analyses de poudre aux rayons X ont révélé la nature des argiles de la terre acide et de la brique (Figure 87).

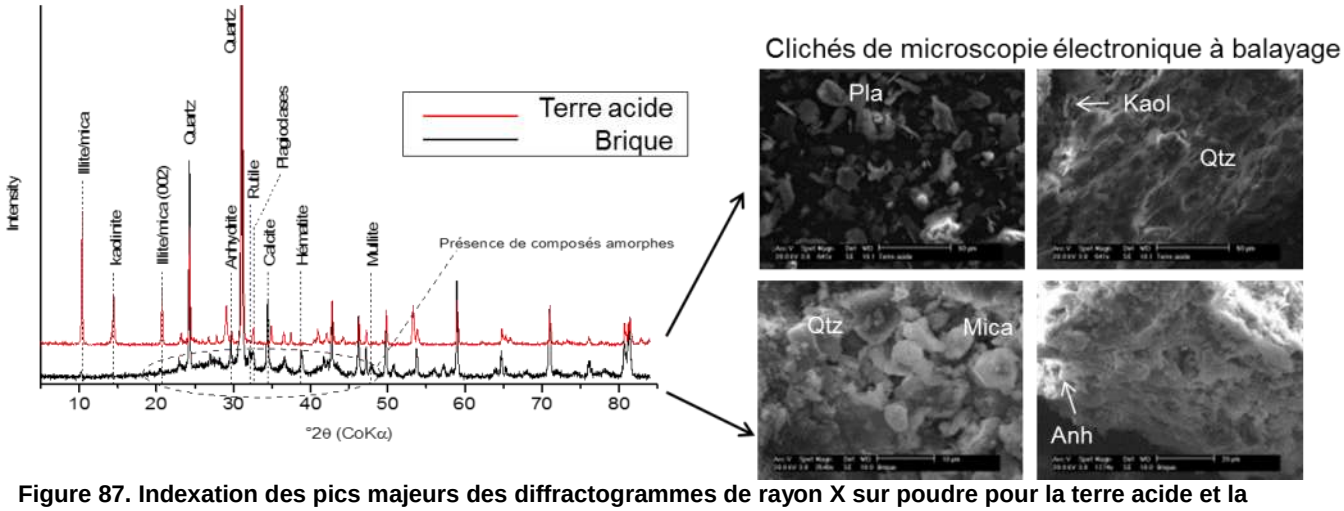


Figure 87. Indexation des pics majeurs des diffractogrammes de rayon X sur poudre pour la terre acide et la brique et clichés en microscopie électronique à balayage (réalisation E. Joussein, Université Limoges, 2013)

Le cortège minéralogique de la terre acide correspondait à du quartz, des plagioclases (albite), des phyllosilicates (illite/mica, kaolinite). Les particules de la terre acide avaient une granulométrie moyenne de type limon (2 – 50 µm). Le cortège minéralogique de la brique correspondait à du quartz, de la calcite, de l'hématite, des plagioclases (albite), de la rutile, de la mulite, et des phyllosilicates (illite/mica, kaolinite, et traces de smectite). Les particules de la brique avaient une granulométrie grossière de type sable (> 50 µm-2000 µm). En première interprétation, il est alors possible de dire que la terre acide était constituée de minéraux « peu réactifs », la teneur en matière organique était normale pour un sol (26 g kg^{-1}), son pH était faible (4,9) et sa teneur en calcaire total était très faible (0,5 g kg^{-1} de $CaCO_3$). La brique était constituée de minéraux « peu réactifs » ou présents sous une forme peu accessible, sa teneur en matière organique était quasi nulle (3 g kg^{-1}), son pH était très élevé (9,3) et la teneur en calcaire total était très forte (89 g kg^{-1} de $CaCO_3$) mais la teneur en calcaire actif était faible (2 g kg^{-1}). La forte granulométrie de la brique, son pH

élevé et sa très faible teneur en matière organique pourraient expliquer la non agrégation avec des produits organiques.

Bilan sur l'impact du facteur humectation-dessiccation, nature de la matière organique et nature de la matière minérale sur l'agrégation au sein des Technosols construits

Nous avons montré qu'il était possible de fabriquer en quelques semaines, en conditions contrôlées, des agrégats stables en mélangeant des déchets organiques et minéraux choisis pour leurs propriétés physiques et chimiques complémentaires. La nature de la matière organique et de la matière minérale joue un rôle très important dans cette agrégation. Le mode d'association des fractions organiques et minérales en lien avec leur nature doit être approfondi. Cette pédogénèse obtenue au laboratoire doit être étudiée et vérifiée par les essais in situ en lysimètres réalisés sur le site du GISFI à Homécourt et sur le site d'Agrocampus Ouest à Angers.

Effet du facteur végétation

La végétation (raygrass (RG) et colza (CZ)) a permis la formation d'agrégats de diamètres moyens pondérés globalement plus élevés que dans les autres expériences. Les mélanges impliquant DV ont favorisé la formation d'agrégats plus stables à l'eau que les agrégats des mélanges TA/CO et que ceux du sol agricole témoin (Figure 88). Les MWD des mélanges TA/DV étaient les plus élevés s'échelonnant de 2,72 à 2,90 mm tandis que les diamètres moyens pondérés des agrégats de BR/DV se distribuent entre 2,42 et 2,52 mm. Il s'agissait pour ces deux mélanges d'agrégats très stables (Le Bissonnais, 1996). Les agrégats des mélanges TA/CO ont montré des diamètres moyens pondérés beaucoup plus faibles qui sont compris entre 0,51 et 0,62 mm. Ces derniers sont du même ordre de grandeur que les diamètres moyens pondérés du sol agricole témoin qui vont de 0,57 à 0,7 mm. Les agrégats formés à partir de TA/CO et du sol témoin sont donc instables (Le Bissonnais, 1996).

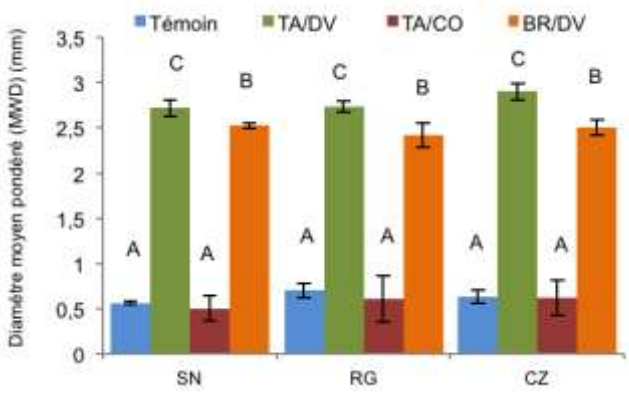


Figure 88. Influence du facteur biologique sur le diamètre moyen (MWD) (mm) des agrégats du sol témoin (Témoin) et des mélanges TA/DV, TA/CO, BR/DV après les modalités de sol nu (SN), culture de raygrass (RG) et celle de colza (CZ) durant 55 jours

La Figure 89 montre (i) qu'il y a un effet significatif des racines de RG et un effet non significatif des racines de CZ (contrastes de Tukey, p-value < 0,05) sur l'agrégation du sol témoin agricole (a) par rapport à la modalité sol nu ; (ii) que pour le mélange TA/DV, c'est l'effet des racines de CZ qui est significatif alors que celui des racines de RG n'est pas significatif par rapport à la modalité sol nu (Figure 89 (b)). Pour les mélanges TA/CO et BR/DV, aucune différence significative n'a été observée entre les 3 modalités de culture (Figure 89 (c) et (d)). L'absence d'influence du facteur biologique pour le mélange BR/DV est surprenante dans la mesure où dans les autres expériences (HD et culture), aucun agrégat n'a pu être récupéré. Cela signifierait que les racines de RG et CZ ne sont pas les facteurs qui ont favorisé la stabilisation des agrégats du mélange. On peut supposer que ce sont les conditions expérimentales de la culture qui ont favorisé l'agrégation (*e.g.* présence permanente d'oxygène atmosphérique).

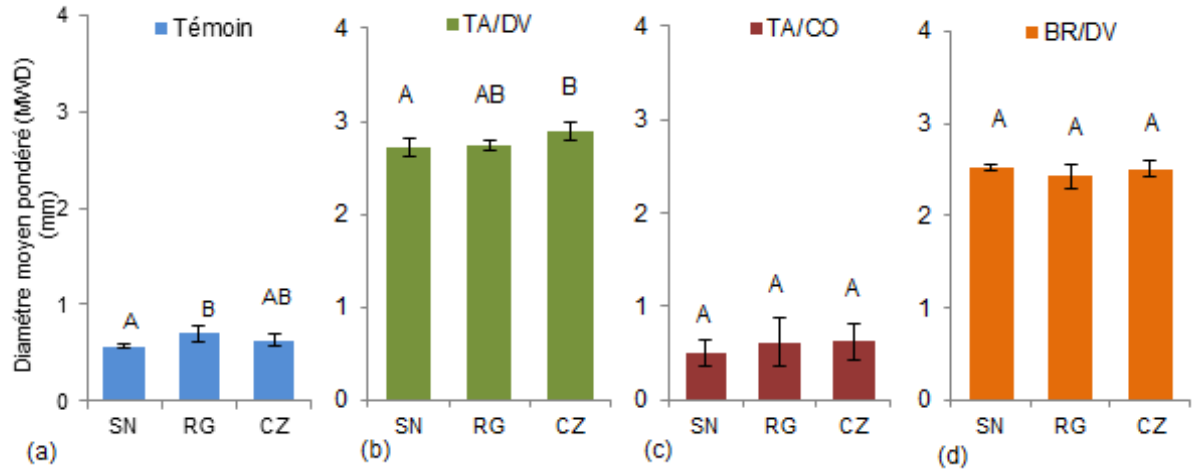


Figure 89. Influence des différentes modalités de culture sur le diamètre pondéré moyen des agrégats du sol témoin agricole (a), des mélanges TA/DV (b), TA/CO (c) et BR/DV (d), A et B désignant les différences significatives (p-value<0,05)

Bilan sur l'impact du facteur biologique sur l'agrégation au sein des Technosols construits

L'effet du facteur biologique a consisté principalement dans la formation d'agrégats très stables (e.g. mélanges TA/DV et BR/DV) : les agrégats formés présentaient des diamètres moyens pondérés supérieurs à 2mm. L'effet des racines sur le processus d'agrégation est cependant démontré uniquement pour le sol témoin agricole et le mélange TA/DV. Aucun effet du facteur biologique sur la stabilité des agrégats n'est révélé pour le mélange TA/CO : les agrégats sont instables et aucun effet des racines n'est observé. Compte tenu du peu de biomasse végétale s'étant développé sur le mélange TA/DV, l'effet sur la stabilisation des agrégats est difficilement attribuable aux racines seules. On peut supposer qu'il s'agisse d'une action couplée des racines et d'un autre facteur biologique.

VI.1.b. Processus d'altération chimique et réactivité des matériaux : évolution du statut du fer lors d'essais de vieillissement accéléré

Objectifs

L'objectif de la caractérisation du fer dans les mélange de matériaux sélectionnés dans le projet SITERRE est d'évaluer dans quelle mesure le vieillissement accéléré de ces mélanges peut avoir une influence sur le statut du fer. En effet, le fer est un indicateur pédologique important car les minéraux porteurs de fer (i) contrôlent dans une large mesure la distribution et la mobilité des éléments traces métalliques dans les sols et (ii) sont considérés comme de bons marqueurs de l'évolution pédologique des sols (Uzarowicz et Skiba, 2011). Cette caractérisation permet d'anticiper, à terme, l'évolution pédologique probable de ces mélanges, soumis à différents processus d'altération lorsqu'ils seront utilisés.

Matériels et méthodes

Essais de vieillissement réalisés

Trois types d'essais de vieillissement accélérés ont été mis en place. Le premier consiste en un essai de plantation en pots sous serre, pour étudier l'influence des plantes sur les mélanges de matériaux. L'essai a été mené durant trois mois, en utilisant du Raygrass (*Iolium perene*). Trois mélanges ont été testés : BR/CO, BA/DR/CO et TA/CO. Par mélange, trois modalités ont été plantées (« *planted* ») et deux non plantées, mais arrosées (« *watered* ») de manière similaire, de manière à disposer de témoins (voir Figure 90).



Figure 90. Essais de plantation sur les mélanges BR/CO, BA/DR/CO et TA/CO.

Le second est l'essai Soxhlet (ADEME, 2009 ; Bayuseno et Schmahl, 2011 ; Benzaazoua et al., 2004 ; Humez et Prost, 1999), qui consiste à faire subir a un matériau solide placé dans un extracteur spécifique des alternances humectation/dessiccation durant 3 mois (voir Figure 91). L'hypothèse est que ces alternances puissent induire des transformations minérales proches de celles rencontrées en condition de pédogenèse. Les mélanges BR/CO et BA/DR/CO ont été testés en triplicat pour cet essai.



Figure 91. Dispositif expérimental de l'essai Soxhlet.

L'essai *in situ* en lysimètres réalisé sur la plateforme expérimentale du GISFI à Homécourt a aussi été considéré comme un essai de vieillissement. Une caractérisation du fer a été réalisée en fonction de la profondeur sur les échantillons prélevés lors du démantèlement du lysimètre L19.

Caractérisation du statut du fer

La caractérisation du fer a été réalisée grâce à plusieurs techniques différentes, complémentaires et permettant de recouper diverses informations.

Spectroscopie Mössbauer

La spectrométrie Mössbauer du fer consiste, à la suite des transitions nucléaires entre l'état fondamental et les états excités dans le noyau de ^{57}Fe (absorbeur), en la mesure de l'émission et l'absorption résonnante de rayons gamma issus d'un émetteur (source radioactive de ^{57}Co) par les noyaux de ^{57}Fe du solide analysé.
La spéciation et l'étude du statut du fer dans les matériaux « environnementaux » montre que cet élément se retrouve principalement dans deux groupes de minéraux : les matériaux argileux et les oxydes. La signature et la discrimination du fer dans ces 2 groupes de minéraux peut s'avérer relativement aisé à l'aide de la spectrométrie Mössbauer.

Les analyses par spectroscopie Mössbauer ont été réalisées au Laboratoire de Chimie Physique et Microbiologie pour l'Environnement (LCPME), UMR 7564, CNRS / Université de Lorraine, à Nancy.

Spectroscopie XPS

En complément à la spectroscopie Mössbauer, des investigations par spectroscopie XPS ont été réalisées au LCPME sur certains échantillons. La spectroscopie XPS donne des informations sur la nature et le degré d'oxydation des éléments chimiques présents à l'extrême surface des grains analysés (jusqu'à quelques nanomètres de profondeur).

Extraction séquentielles

Une extraction séquentielle consiste à mettre en contact un matériau solide avec des réactifs destinés à solubiliser certaines espèces porteuses de fer. Dans un second temps, un dosage du fer extrait en solution est réalisé pour quantifier la proportion relative de ces espèces.
Dans notre cas, les extractions séquentielles ont été réalisées selon deux méthodes : la méthode citrate – dithionite – bicarbonate (CBD), et la méthode pyrophosphate (Pansu et Gautheyrou, 2006). Ces deux méthodes sont complémentaires puisque la première consiste à extraire le fer des oxydes et hydroxydes de fer pédogénétiques, alors que l'extraction par pyrophosphate est utilisée pour solubiliser les formes de fer complexées à la matière organique des sols, ainsi que certains oxydes de fer mal cristallisés.

Résultats - essais Soxhlet et plantation

Les résultats des extractions séquentielles ont été regroupés en Figure 92 pour les essais Soxhlet et les essais de plantation. Les résultats de caractérisation par Mössbauer sont répertoriés dans le Tableau 61.

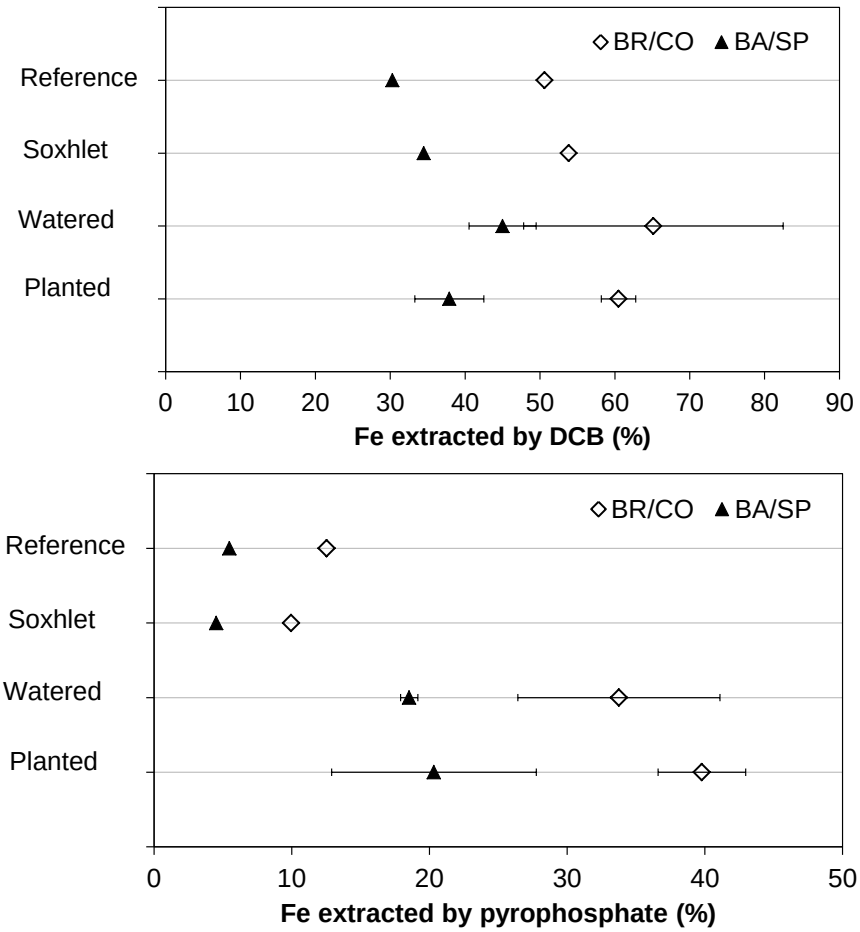


Figure 92. Résultats des extractions séquentielles pour le fer après réalisation des essais de vieillissement accélérés (témoin non vieilli, soxhlet, essai arrosé mais non planté, essai planté)

Tableau 61. Synthèse des résultats de caractérisation par Mössbauer du statut du fer

Echantillon	Mössbauer (% oxydes)
TA/CO témoin t0	64% goethite
TA/CO plante	57% goethite, 7% ferrihydrite
TA/CO témoin sans plante	57% goethite, 2% ferrihydrite
BR/CO témoin t0	13% goethite, 33% hématite
BR/CO plante	9% goethite, 13% hématite
BR/CO témoin sans plante	10% goethite, 16% hématite
BR/CO soxhlet	14% goethite, 38% hématite
BA/DR/CO témoin t0	38% Fe^{3+} (hors argiles)
BA/DR/CO plante	50% Fe^{3+} (hors argiles)
BA/DR/CO témoin sans plante	15% goethite
BA/DR/CO soxhlet	14% goethite, 8% oxydes mal cristallisés, 5% Fe^{n+} (hors argiles)

Les résultats des extractions séquentielles par pyrophosphate indiquent que les essais de plantation entrainent une apparition de fer associé à la matière organique par rapport au témoin initial. Cependant, les modalités arrosées mais non plantées de ces essais montrent la même quantité de fer associé à la matière organique que pour les modalités plantées. Une hypothèse qui pourrait expliquer ce résultat est que l'arrosage sous serre favorise la croissance bactérienne, et que le fer serait associé à cette biomasse.
Par ailleurs, on note que pour le mélange TA/CO, une précipitation d'oxydes de fer pédogénétiques de type ferrihydrite est intervenue au cours des essais de plantation, soulignant un début de pédogenèse (voir Tableau 61).
Pour le mélange BR/CO, il existe une variabilité importante des résultats, s'expliquant par la proportion fluctuante d'hématite dans ce mélange (13 à 38%). Cela est lié au fait que l'hématite est présente dans les briques uniquement, et que suite au tamisage et à l'échantillonnage, le nombre de fragments de briques pris en compte lors de l'analyse est variable.
Enfin, les résultats de l'essai Soxhlet sur les mélanges BR/CO et BA/DR/CO indiquent que le statut du fer n'a pas évolué après trois mois d'essai. La pertinence de l'utilisation de ce type d'essai pour accélérer les phénomènes de pédogenèse se pose donc.

VI.2. Evolution de l'état et flux depuis les sols construits : validation en vraie grandeur du procédé de construction de sol

VI.2.a. Description des dispositifs

Deux sites lysimétriques ont été mis en place afin de suivre *in situ* l'évolution des propriétés physico-chimiques de sols construits en présence de végétaux. Ces sites, basés à Homécourt (GISFI, 57) et Angers (Agrocampus Ouest, 49), ont eu pour objectif de suivre l'évolution de sols correspondant à des usages de type "square et parc" et "arbre d'alignement", respectivement. A Homécourt, il s'agit de lysimètres cylindriques (1 m^2 de surface, 2 m de profondeur), installés en 2012, et à Angers, de lysimètres parallélepipédiques (L x l x H = 1,11 x 0,71 x 0,57 m), installés en 2013. Les lysimètres sont constitués de 2 matériaux, un matériau de croissance reposant sur un matériau squelette. Les caractéristiques de ces matériaux sont présentées dans le Tableau 62.
A Homécourt, du raygrass a été semé (*Lolium perenne L.* var *Tove*) et à Angers des érables platane (*Acer platanoïdes*) ont été plantés.

Tableau 62. Composition du matériau de croissance et des matériaux squelette. Les valeurs sont des proportions massiques

Mélange	Fraction terreuse		Fraction minérale grossière		Fraction organique	
	Origine	Proportion	Origine	Proportion	Origine	Proportion
Matériau de croissance						
BR-CO	--	--	Brique	0.47	Co-Compost boue STEP et déchets verts	0.53
Matériau squelette						
Témoin	Terre excavée acide (TA)	0.27	Calcédoine	0.70	Compost de déchets verts	0.03
TA-BA-BS	Terre excavée acide (TA)	0.20	Ballast usage (BA)	0.76	Boue de station d'épuration (BS)	0.04
TA-BE-DV	Terre excavée acide (TA)	0.32	Déchet de béton (BE)	0.65	Déchets verts (DV)	0.03
TA-DB-DV	Terre excavée acide (TA)	0.22	Déchet de bâtiment (DB)	0.75	Déchets verts (DV)	0.03

VI.2.b. Etat du compartiment Sol

Dispositif lysimétrique du GISFI

A l'issue du démantèlement des lysimètres entre septembre et octobre 2014 (Figure 93), après 2 ans de monitoring, des échantillons solides ont été prélevés et ont fait l'objet de caractérisation. Les valeurs mesurées à t_{2ans} ont ainsi pu être comparées à celles qui avaient été obtenus sur les mélanges au moment de leur réalisation (t_0).



Figure 93 : Aspect des lysimètres pendant les premières étapes du démantèlement et préparation des échantillons (quartage + tamisage)

Fertilité chimique

Les pH de l'intégralité des mélanges utilisés pour la construction des deux modalités de sol construit étaient neutre à basique. Ils ont globalement peu évolué au cours des deux ans d'expérimentation (Figure 94). En effet, le pH à l'eau du mélange BR/CO était initialement de 7,4 et les valeurs mesurées sur les deux modalités varient entre 7,25 (pour la modalité « square & parc » entre 8 et 36 cm de profondeur) et 7,52 (pour la modalité « arbre de plantation » entre 14 et 39 cm de profondeur). Une baisse sensible a été observée sur le mélange BA/SP où le pH initialement de 8,40 a légèrement décru (entre 8,2 et 8,36) sans qu'une relation avec la profondeur ne soit mise en évidence. Des évolutions plus marquées sont visibles sur le mélange TA/BE/DV. En effet, le pH était initialement de 8,20, mais a eu tendance à augmenter (entre 8,29 et 8,53), à l'exception de la surface (pH = 8,16 entre 0 et 14 cm). L'augmentation peut être expliquée par le comportement du béton, dont le pouvoir tampon basique est très élevé.

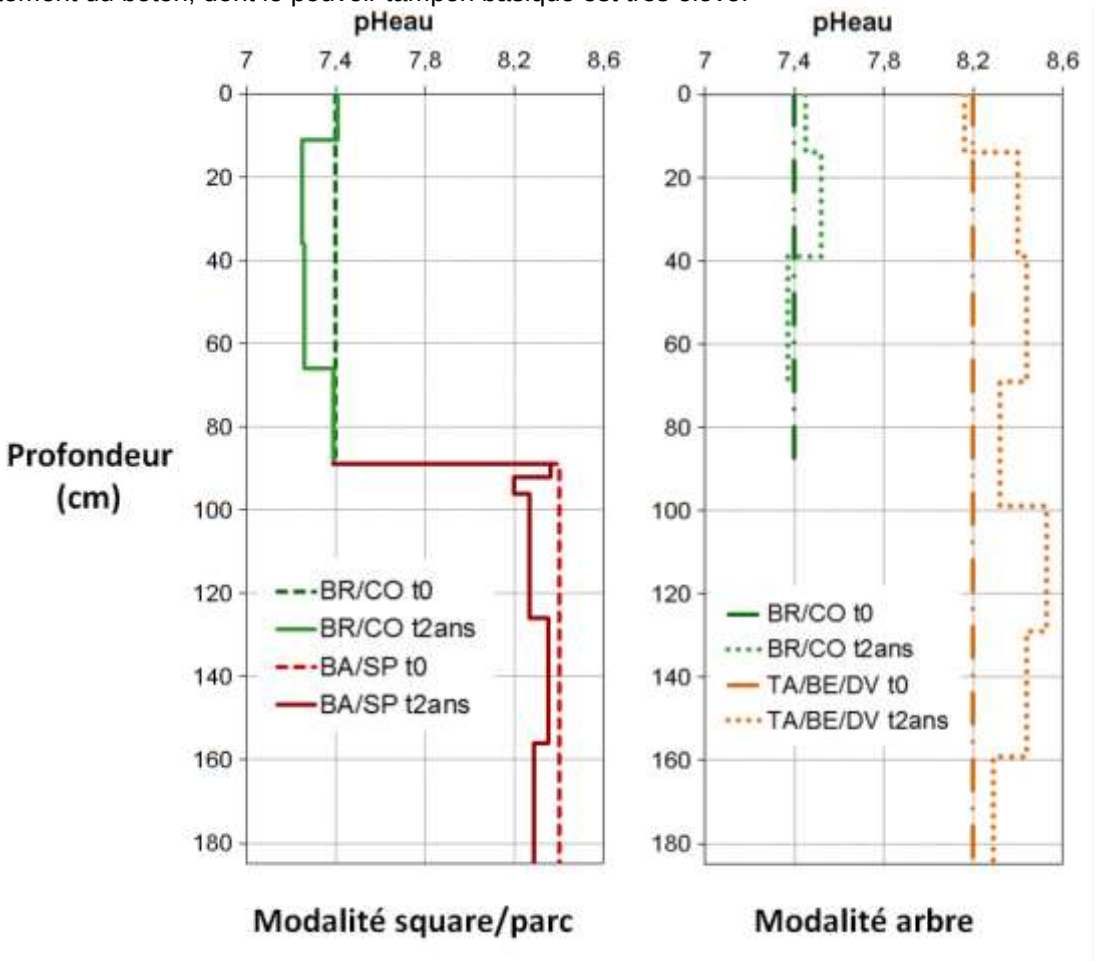


Figure 94 : Evolution du pH_{eau} au cours du temps (t_0 et t_{2ans}) et en fonction de la profondeur pour les modalités "square & parc" et "arbre de plantation "

Pour ce qui concerne l'évolution de la concentration en carbone organique, deux comportements distincts émergent. Les concentrations évoluent peu dans les mélanges BA/SP et TA/BE/DV (y compris en surface pour TA/BE/DV) (Figure 95). Par contre, de manière surprenante, les concentrations en carbone organique ont significativement augmenté, en surface, dans les mélanges BR/CO. Ceci est particulièrement vrai dans la modalité « square & parc » ($[C_{org}]t_0$ = 148 $g.kg^{-1}$; 168 $g.kg^{-1}$ < $[C_{org}]t_{2ans}$ < 175 $g.kg^{-1}$), mais également dans la modalité « arbre de plantation » (157 $g.kg^{-1}$ < $[C_{org}]t_{2ans}$ < 164 $g.kg^{-1}$) (Figure 95).

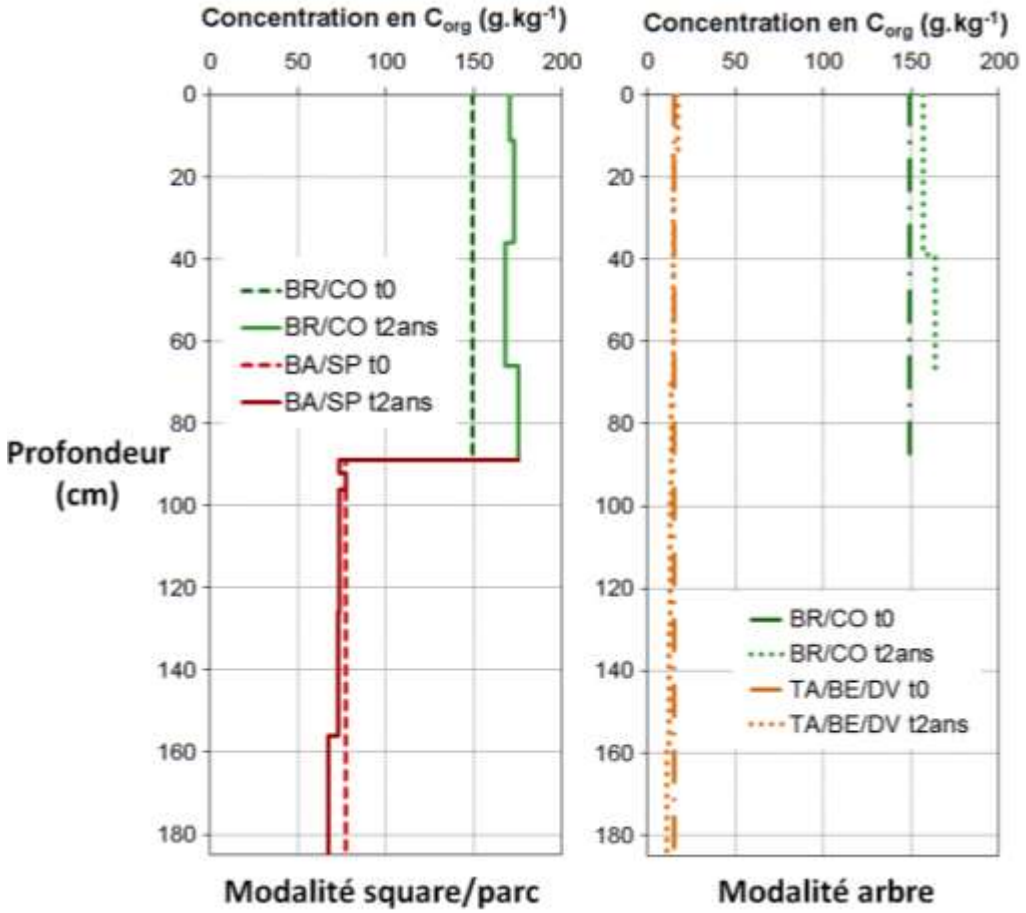


Figure 95 : Evolution de la concentration en carbone organique au cours du temps (t_0 et t_{2ans}) et en fonction de la profondeur pour les modalités "square & parc" et "arbre de plantation "

Les concentrations en azote total ont peu évolué au cours du temps, à l'exception d'une légère augmentation dans l'horizon BR/CO de la modalité « square & parc » ($[N_{tot}]t_0$ = 17,0 g.kg^{-1} ; 17,5 g.kg^{-1} < $[N_{tot}]t_{2ans}$ < 18,4 g.kg^{-1}) (Figure 96). Dans une moindre mesure, la concentration en azote augmente légèrement dans le mélange TA/BE/DV de la modalité « arbre de plantation », en particulier dans la partie supérieure où elle passe de 1,0 g.kg^{-1} à 1,6 g.kg^{-1}. Vraisemblablement, ce sont des transferts latéraux depuis le mélange BR/CO adjacents qui pourraient être à l'origine de cet enrichissement.

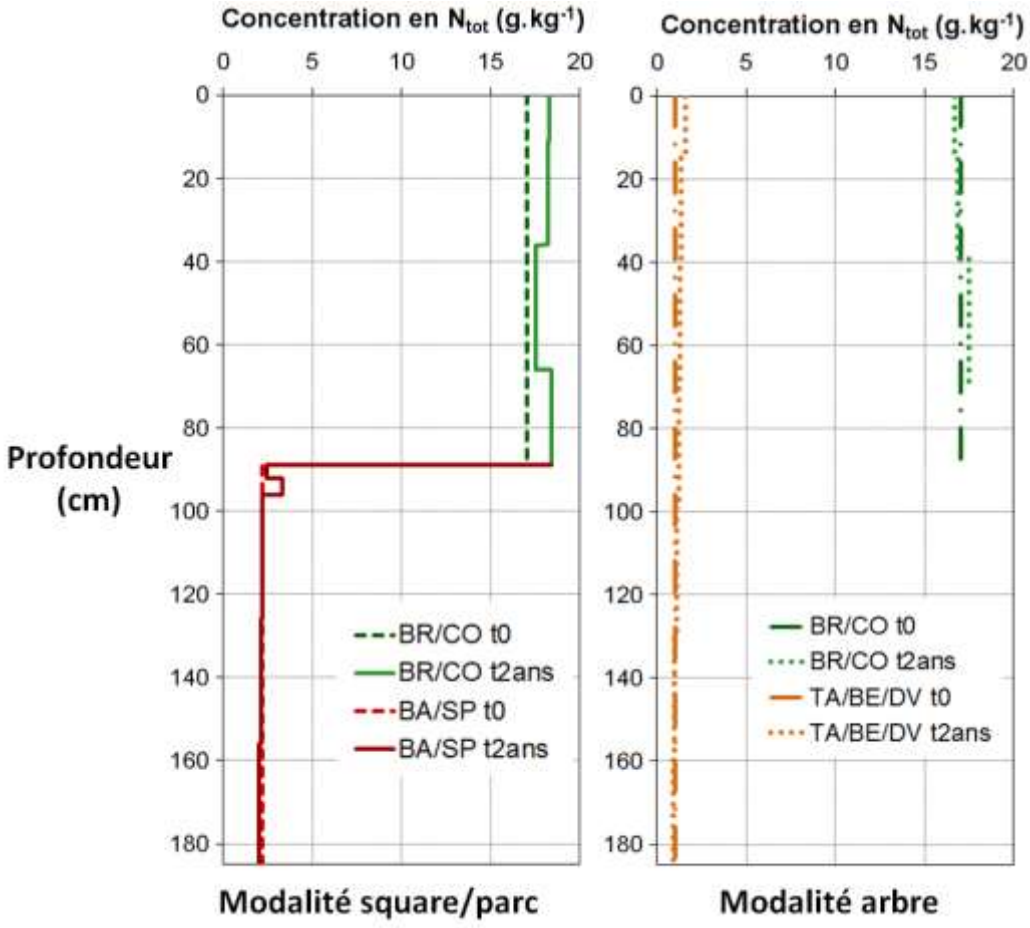


Figure 96 : Evolution de la concentration en azote total au cours du temps (t_0 et t_{2ans}) et en fonction de la profondeur pour les modalités "square & parc" et "arbre de plantation "

De manière encore plus marquée, les mécanismes d'enrichissement/transferts décrits pour le carbone organique et pour l'azote sont visibles pour le phosphore disponible pour les plantes. En effet, hormis dans les parties inférieures des mélanges BA/SP et TA/BE/DV où ces concentrations ont peu évolué, une augmentation est globalement observée. Celle-ci est d'autant plus marquée que l'on est proche de la surface, quelle que soit la modalité considérée. La concentration double pratiquement, dans les 40 premiers cm, dans le mélange BR/CO ($[P_{Olsen}]t_0$ = 0,45 g.kg^{-1} ; $[P_{Olsen}]t_{2ans}$ = 1,00 g.kg^{-1}). Le même phénomène est observable dans la partie supérieure du mélange TA/BE/DV ($[P_{Olsen}]t_0$ = 0,06 g.kg^{-1} ; $[P_{Olsen}]t_{2ans}$ = 0,16 g.kg^{-1}) et même à l'interface entre BR/CO et BA/SP pour la modalité « square & parc » ($[P_{Olsen}]t_0$ = 0,07 g.kg^{-1} ; $[P_{Olsen}]t_{2ans}$ = 0,13 g.kg^{-1}) (Figure 97).

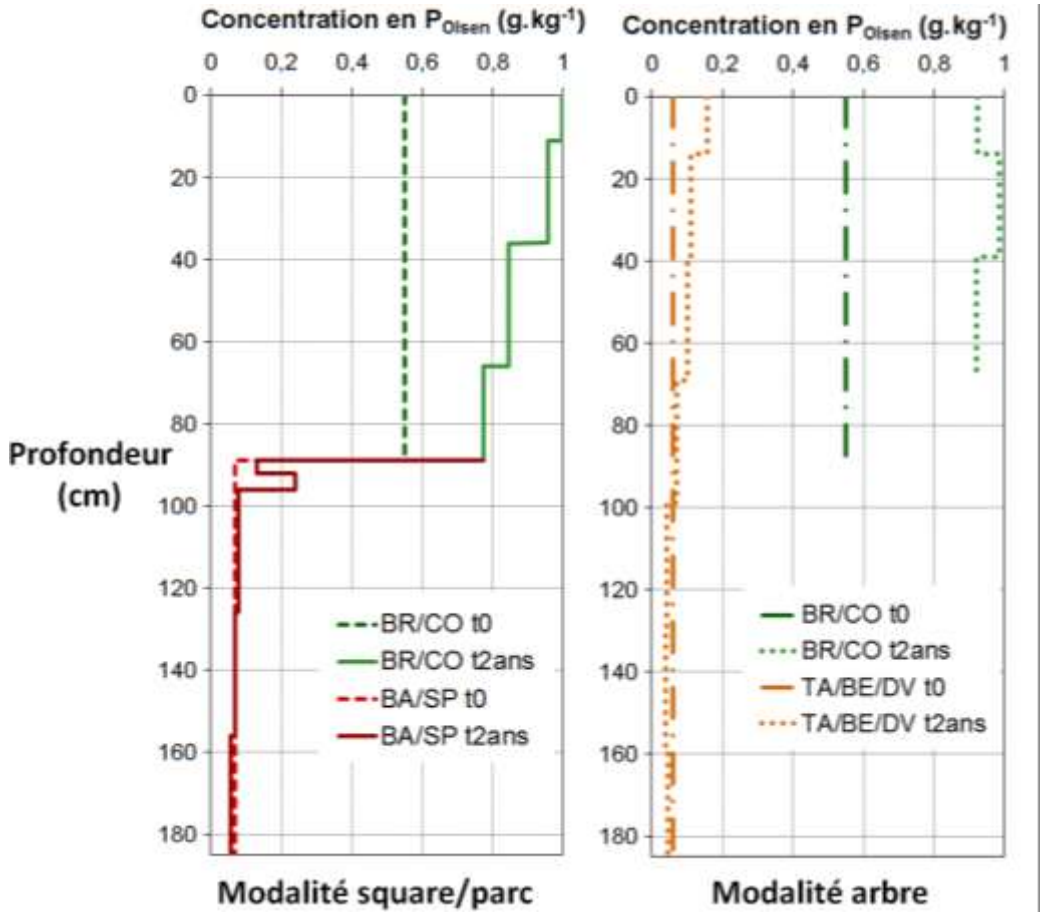


Figure 97 : Evolution de la concentration en phosphore assimilable au cours du temps (t_0 et t_{2ans}) et en fonction de la profondeur pour les modalités "square & parc" et "arbre de plantation "

Pour la modalité « square & parc », les concentrations en calcaire total ont peu évolué au cours du temps (Figure 98). Par contre, des variations significatives ont été observées pour la modalité « arbre de plantation, en particulier un enrichissement net du mélange BR/CO ($[CaCO_3]t_0$ = 9,0 g.kg^{-1} ; $[CaCO_3]t_{2ans}$ = 15,0 g.kg^{-1}) et un appauvrissement tout aussi marqué dans la partie supérieur du mélange TA/BE/DV ($[CaCO_3]t_0$ = 16,3 g.kg^{-1} ; $[CaCO_3]t_{2ans}$ = 9,0 g.kg^{-1}). Ce phénomène pourrait être expliqué à nouveau par des échanges entre les deux matériaux aussi bien de particules solides que de solutés. A l'inverse, il est intéressant de noter un léger enrichissement à la base du mélange TA/BE/DV qui pourrait illustrer une recarbonatation en profondeur.

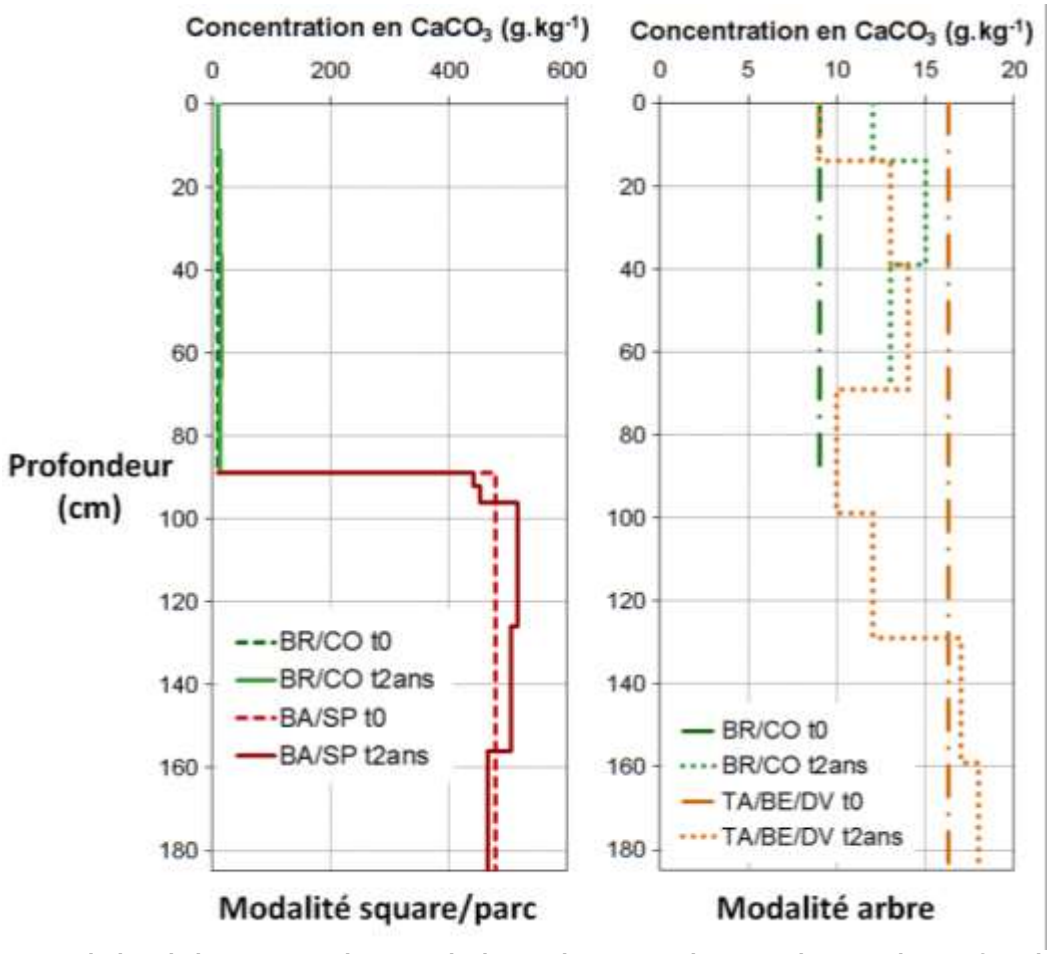


Figure 98 : Evolution de la concentration en calcaire total au cours du temps (t_0 et t_{2ans}) et en fonction de la profondeur pour les modalités "square & parc" et "arbre de plantation "

Fertilité physique

Dans le cas de la modalité « square & parc », la masse volumique apparente diminue en surface (entre 0 et 10 cm), probablement sous l'effet du développement racinaire et augmente à la base du profil (entre 156 et 185 cm), probablement sous l'effet du tassement du sol (Figure 99). Le cas de la modalité « arbre de plantation » est plus complexe. En effet, en surface, comme dans le cas des éléments chimiques, il semble y avoir des interactions entre les deux matériaux qui entraînent une augmentation de la masse volumique apparente du mélange BR/CO et une baisse du mélange TA/BE/DV.

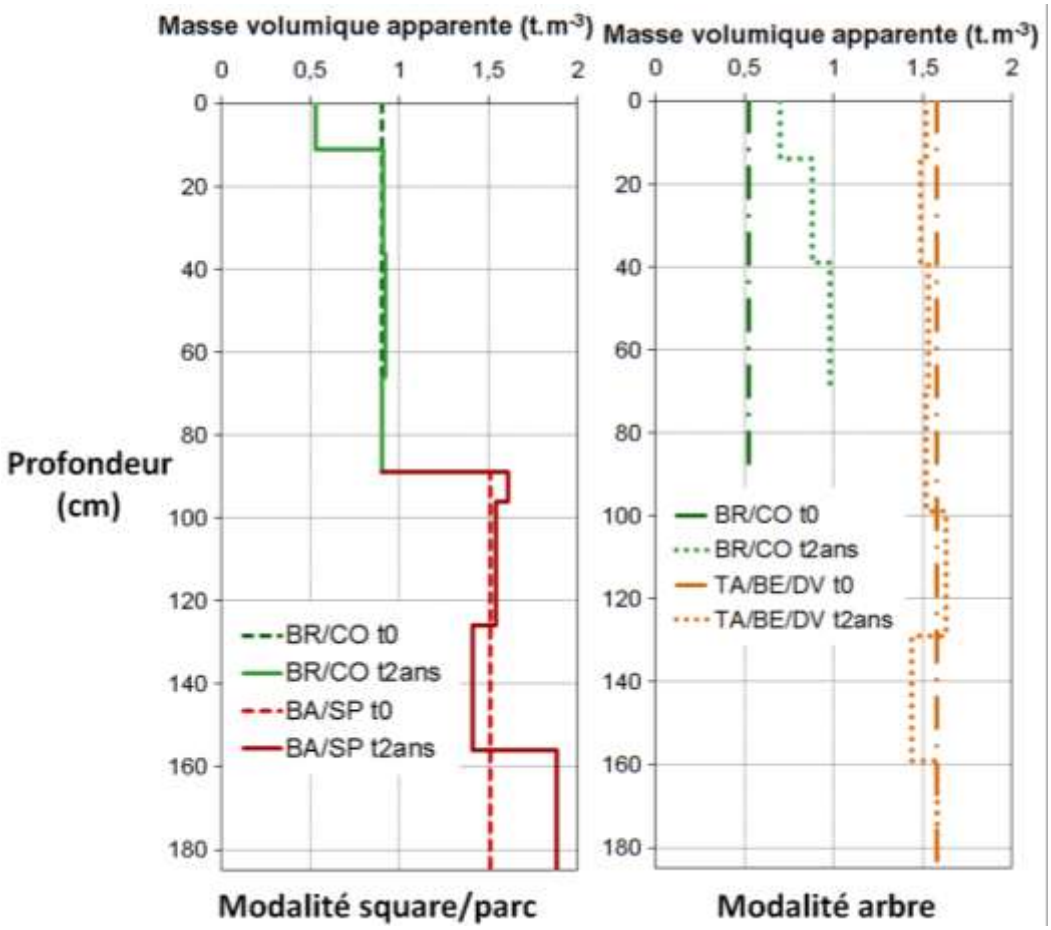


Figure 99 : Evolution de la masse volumique apparente au cours du temps (t_0 et t_{2ans}) et en fonction de la profondeur pour les modalités "square & parc" et "arbre de plantation "

La présence d'agrégats après 24 mois dans les 2 modalités a été déterminée par le test de réhumectation lente par capillarité et nous avons mesuré la stabilité des agrégats éventuellement formés dans les couches BR/CO des deux modalités et dans la couche BA/SP de la modalité square/parc. Des agrégats se sont formés dans le mélange BR/CO dès la surface pour la modalité square/parc et à partir de 15 cm de profondeur pour la modalité arbre (Figure 100). Les valeurs mesurées de diamètre moyen pondéré (MWD) dans le mélange BR/CO sont supérieures à 2 ce qui correspond à des agrégats très stables résistants à l'éclatement partiel et au gonflement différentiel. Contrairement aux essais en conditions expérimentales contrôlées qui n'avaient pas permis la formation d'agrégats pour le mélange BR/CO, les essais en lysimètre ont permis la mise en place d'un processus d'agrégation.

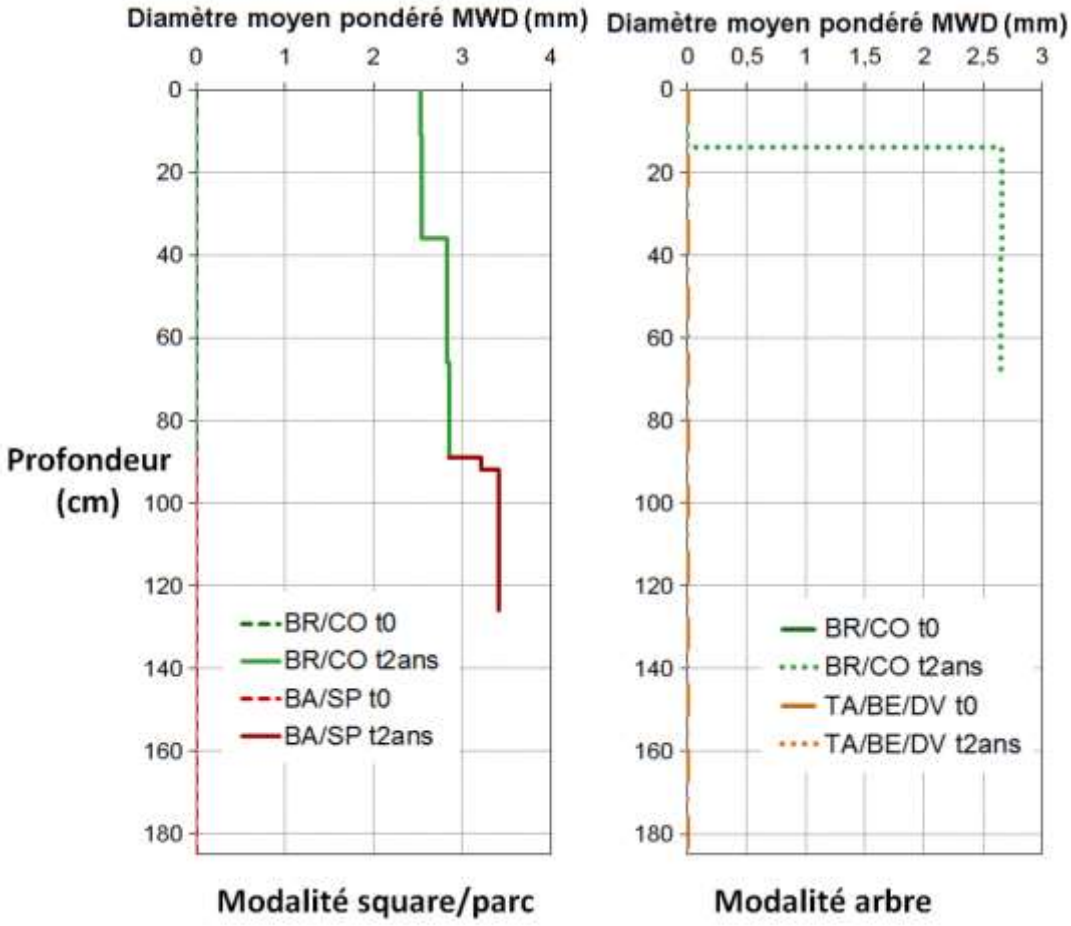


Figure 100. Evolution du diamètre moyen pondéré (MWD) au cours du temps (t0 et t2ans) et en fonction de la profondeur pour les modalités "square & parc" et "arbre de plantation "

Statut du fer

Les résultats des extractions séquentielles montrent une évolution en fonction de la profondeur, avec une abondance relative d'oxydes de fer plus importante en surface. Ainsi, les formes les moins libres de Fe, et les moins associées au carbone organique, se retrouvent en profondeur, à 140 cm. De plus, en condition de terrain (lysimètre), on retrouve plus de fer sous forme d'oxydes pédogénétiques que lors des essais de vieillissement accéléré de laboratoire (soxhlet et plantation, cf Figure 92), ce qui indique une évolution plus poussée. Enfin l'abondance relative des oxydes de fer est plus importante au toit de BA/SP plutôt qu'en profondeur : cela pourrait expliquer les colorations particulières des nodules (rouges et vert grisâtres) observées au toit de BA/SP lors du démantèlement du lysimètre.

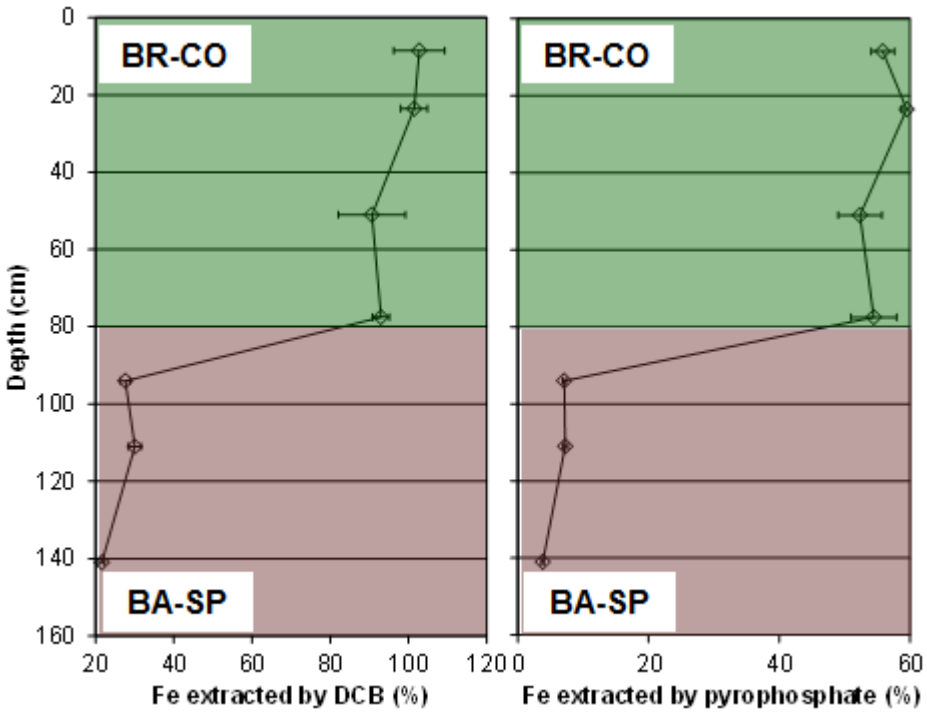


Figure 101. Résultats des extractions séquentielles pour le fer en fonction de la profondeur dans le lysimètre «SQUARE & PARC»

Les analyses par spectrométrie Mössbauer ont été réalisées sur les échantillons prélevés dans le demi-compartiment supérieur (mélange BR/CO uniquement) qui ont été tamisés à 2 mm. Ces analyses montrent que le fer est majoritairement dans son état oxydé Fe^{III} (Tableau 63). Les échantillons contiennent tous néanmoins une quantité comprise entre ~ 5 % et ~ 7 % de fer ferreux Fe^{II} paramagnétique. Ces espèces Fe(II) sont probablement piégées au sein d'une phase argileuse, ce qui leur confère une grande stabilité. On note un changement dans les ratios Fe(II)/Fe(III) de l'échantillon BR/CO témoin et ceux du lysimètre, avec 20% pour le témoin et 5 à 10% pour le lysimètre, ce qui indiquerait une tendance à l'oxydation du Fe en condition de terrain. Par contre, le ratio Fe(II)/Fe(III) ne dépend pas de la profondeur de prélèvement et se situe toujours entre et 5% et 10% quelle que soit la profondeur. La seule différence entre les échantillons prélevés sur le terrain et l'échantillon témoin est la répartition entre les espèces Fe(III) paramagnétiques (probablement sous forme d'argile ou d'oxyde ferrique très mal cristallisé de type ferrihydrite) et les espèces Fe(III) sous forme d'oxydes (hématite ou goethite). En effet, la proportion d'hématite et/ou de goethite au sein des échantillons de terrain se situe entre ~14% et 17% alors qu'elle est de 46 % pour l'échantillon témoin BR/CO. Là encore, cette différence pourrait être due au fait que l'hématite est présente dans les briques uniquement, et que suite au tamisage et à l'échantillonnage, le nombre de fragments de briques pris en compte lors de l'analyse est variable. Une autre explication possible est liée à d'éventuels phénomènes de lessivage et/ou de bioréduction de ces oxydes en conditions environnementales. Le phénomène éventuel de lessivage pourrait également mis en relation avec les colorations particulières des nodules (rouges et vert grisâtres) observées à l'interface entre les deux compartiments du lysimètre «SQUARE & PARC».

Tableau 63. Résultats de caractérisation par Mössbauer du statut du fer dans le lysimètre L19 et comparaison avec le témoin à t_0

Echantillon	Abondance relative (%)[a]			
	Fe^{2+}	Fe^{3+}	Hématite	Goethite
BR/CO témoin t_0	9	45	33	13
L19 - 6-11 cm	7	76	10	7
L19 - 11-36 cm	6	79	11	4
L19 - 36-66 cm	5	81	8	6

[a]La précision est de l'ordre de 10%

Dispositif lysimétrique Agrocampus Ouest

Des lysimètres ont été démontés à t_{1an} et à t_{2ans} c'est-à-dire 3 lysimètres correspondant à 3 modalités en juin 2014 et trois autres lysimètres en juin 2015 (xxx). Il reste une modalité de 3 lysimètres qui sera démonté en juin 2016. Des échantillons solides ont été prélevés et ont fait l'objet de caractérisation. Les valeurs

mesurées à t_{2ans} ont ainsi pu être comparées à celles qui avaient été obtenus sur les mélanges au moment de leur réalisation (t_0).

Fertilité chimique

Les propriétés chimiques des matériaux du site d'Angers sont présentées dans le Tableau 64. L'ensemble des éléments analysés ne présente pas de risque majeur quant à la croissance de végétaux. Notamment, très peu de carences sont observées et concernent principalement le potassium et plus spécifiquement les métaux tels que le cuivre, le manganèse et le fer pour TA/BA/DV. On constate néanmoins que le pH du matériau squelette témoin est préoccupant car il se situe est aux alentours de 4.4. Ces caractéristiques sont relativement stables entre 2014 et 2015.

Tableau 64. Caractéristiques chimiques des matériaux, un an (2014) et deux ans (2015) après la plantation d'arbres, et mise en évidence des excès et carences en éléments pour la croissance végétale. Les chiffres entre parenthèses sont les erreurs standard (n=3)

		MO	N total	C/N	pH H_2O	CEC	CaO	P_2O_5	K_2O
		(g kg^{-1})	(g kg^{-1})			(cmol+ kg^{-1})	(g kg^{-1})	(g kg^{-1})	(g kg^{-1})
BR/CO	2014	119,50 (12,98)	7,13 (0,86)	9.8	7,27 (0,20)	19,97 (2,32)	8,15 (2,36)	0,54 (0,07)	0,26 (0,04)
	2015	102.13 (15.89)	6.83 (0.21)	8.7 (0.21)	7.17 (0.27)	20.83 (3.26)	8.37 (1.72)	0.94 (0.45)	0.26 (0.02)
Témoin	2014	61,77 (7,93)	2,20 (0,70)	18.0	4,63 (0,18)	13,00 (1,29)	3,14 (0,43)	0,20 (0,03)	0,10 (0,01)
	2015	55.33 (0.50)	1.93 (0.22)	16.93 (1.98)	4.2 (0.19)	11.97 (0.43)	2.70 (0.56)	0.17 (0.03)	0.09
TA/BA/BS	2014	48,10 (6,92)	3,43 (0,39)	8.1	6,53 (0,29)	11,10 (1,44)	3,00 (0,02)	0,42 (0,05)	0,17 (0,03)
	2015	50.9 (9.71)	3.73 (0.72)	7.93 (0.11)	5.93 (0.16)	13.07 (3.32)	2.58 (0.68)	0.51 (0.06)	0.22 (0.09)
TA/DB/DV	2014	26,83 (5,08)	1,13 (0,32)	14.4	7,77 (0,04)	4,77 (0,75)	14,03 (1,45)	0,10 (0,0)	0,13 (0,01)
	2015	27.27 (2.61)	1.33 (0.15)	11.93 (0.64)	7.77 (0.04)	5.4 (0.44)	15.47 (2.67)	0.10 (0.02)	0.17 (0.05)

		MgO	Na_2O	Cu EDTA	Zn EDTA	Mn EDTA	Fe EDTA	Bo soluble
		(g kg^{-1})	(g kg^{-1})	(mg kg^{-1})	(mg kg^{-1})	(mg kg^{-1})	(mg kg^{-1})	(mg kg^{-1})
BR/CO	2014	0,28 (0,02)	0,08 (0,01)	6,80 (2,98)	41,00 (1,87)	13,33 (2,04)	170,33 (58,59)	0,40 (0,07)
	2015	0.29 (0.05)	0.07 (0.01)	6.95 (3.71)	41.66 (6.68)	11.33 (3.56)	164.33 (75.16)	0.67 (0.18)
Témoin	2014	0,10 (0,02)	0,03 (0,01)	3,27 (0,15)	7,67 (3,89)	32,00 (2,12)	1074,67 (36,09)	0,43 (0,04)
	2015	0.08 (0.01)	0.02	2.97 (0.23)	6.33 (1.08)	27 (1.87)	1057 (80.41)	0.63 (0.08)
TA/BA/BS	2014	0,28 (0,03)	0,04 (0,00)	24,57 (1,63)	35,67 (2,94)	18,67 (2,48)	640,00 (23,27)	1,13 (0,04)
	2015	0.25 (0.08)	0.05 (0.01)	29.03 (3.97)	38.67 (7.56)	17.33 (2.16)	510.33 (3.56)	1.60 (0.44)
TA/DB/DV	2014	0,08 (0,00)	0,03 (0,01)	1,73 (0,25)	14,67 (1,78)	6,00 (0,71)	10,43 (3,64)	0,73 (0,16)
	2015	0.09 (0.03)	0.03 (0.01)	1.77 (0.11)	16.33 (1.78)	6.33 (0.41)	9.73 (3.12)	0.93 (0.16)

excès carence

Fertilité physique

L'évolution de la masse volumique apparente (mva) des matériaux squelettes est présentée dans le tableau suivant :

Matériau squelette	Année	Mva (g. cm^{-3})	Porosité totale (%)
Témoin	2013	1.71	35.1
	2014	1.83	30.3
	2015	1.79	32.1
TA/BA/BS	2013	1.68	37.7
	2014	1.89	29.6
	2015	1.90	29.4
TA/DB/DV	2013	1.38	45.1
	2014	1.49	40.5
	2015	1.51	39.9

Les valeurs de mva sont contrastées selon le matériau considéré. En l'occurrence le matériau TA/DB/DV présente une mva significativement inférieure aux autres matériaux. L'évolution de la mva au cours du temps montre une augmentation sensible au bout d'un an de mise en place des mélanges, entre 2013 et 2014, puis une relative stabilisation 2 ans après installation. L'évolution de la porosité totale est logiquement corrélée avec l'évolution de la mva : elle décroit entre 2013 et 2014 et se stabilise lors de la 2^{e} année.

Nous avons mesuré dans les lysimètres la stabilité des agrégats (test de réhumectation lente) qui auraient pu se former dans le mélange de croissance BR/CO après 12 et 24 mois (Figure 102). Après un an, des agrégats se sont formés dans le mélange BR/CO dans tous les lysimètres mais les valeurs sont variables d'un bac à l'autre et dépendent de la profondeur. Pour le témoin les agrégats formés sont stables (MWD > 1,5mm) en 2014 et 2015 à 7 et 15 cm de profondeur. Pour les bacs TA/BA/BS, les agrégats de BR/CO sont moyennement stables et la stabilité augmente au cours du temps en surface. Pour les bacs TA/DB/DV, les agrégats sont stables en surface dès 2014 et instable en profondeur.

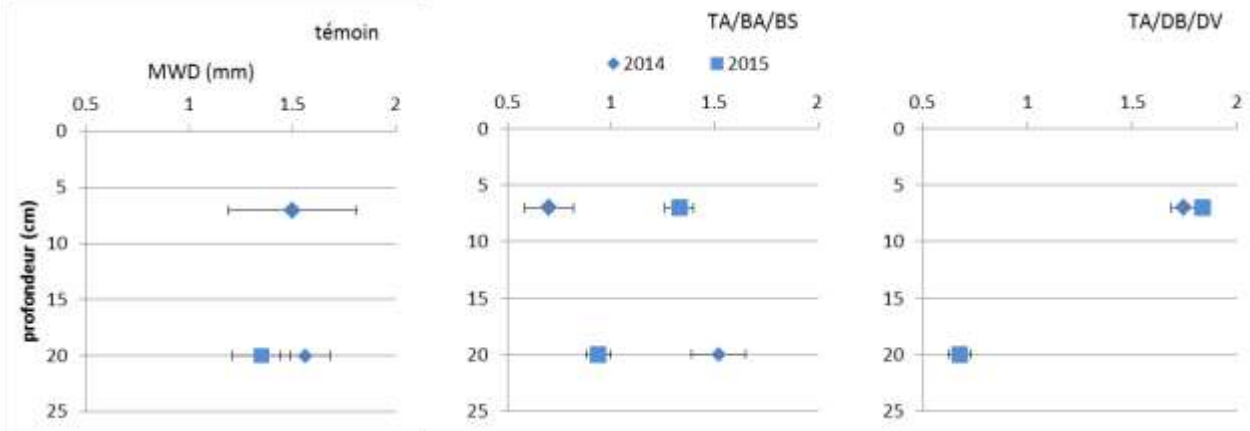


Figure 102. Evolution du diamètre moyen pondéré (MWD) au cours du temps (t12 et t2ans) et en fonction de la profondeur pour les modalités des mélanges terre-pierre

Des mesures d'infiltrométrie ont été réalisées 1 fois par an, afin de déterminer les propriétés hydrodynamiques des différents matériaux. De ces propriétés, la réserve utile et la macroporosité du sol ont été évaluées (Figure 103 & Figure 104). Entre 2014 et 2015, il n'y a pas eu de tassement significatif des matériaux.

Les valeurs de réserve utile sont exprimées en mm d'eau par cm de sol. En 2014, les matériaux squelettes présentent des réserves utiles comprises entre 0,55 et 0,86 cm mm^{-1}, valeurs comparables à des sols sableux. En supposant qu'en période estivale que l'évapotranspiration des arbres est de 5 mm par jour, l'autonomie hydrique des lysimètres est alors d'environ 6 jours. Le matériau de croissance présente la plus forte valeur de réserve utile (3,9 cm mm^{-1}) en raison de la forte teneur en matières organiques et donc d'une aptitude de rétention en eau forte. Parmi les matériaux squelettes TA/BE/DV possède la plus forte valeur de réserve utile peut être en raison de la capacité du béton à stocker de l'eau dans sa porosité contrairement aux autres pierres des autres matériaux squelettes. En 2015, la réserve utile des matériaux n'évolue pas, excepté pour le matériau de croissance pour lequel elle baisse, et pour le matériau squelette TA/DB/DV qui présente avec une hausse significative. L'activité de dégradation de la matière organique est le principal facteur explicatif de telles évolutions.

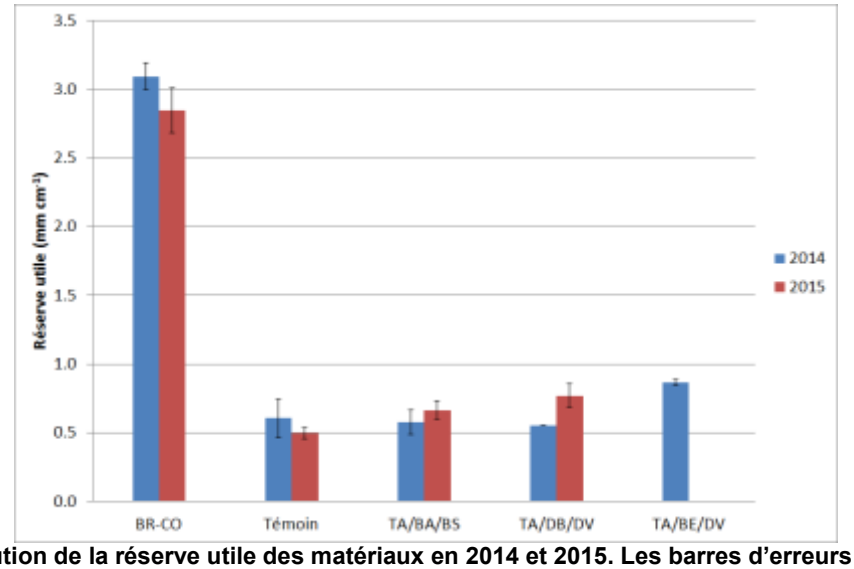


Figure 103. Evolution de la réserve utile des matériaux en 2014 et 2015. Les barres d'erreurs sont des erreurs standard (n=3)

La macroporosité permet d'évaluer la capacité d'un sol à favoriser l'aération du milieu pour le développement racinaire notamment. Il est généralement considéré que la macroporosité doit être supérieure à 20% en volume pour satisfaire cette aération. Cette condition n'est respectée que par le matériau de croissance et les 2 matériaux squelette TA/DB/DV et TA/BE/DV (Figure 104). Les matériaux squelette témoin et TA/BA/BS présentent une capacité d'aération défavorable. Un an plus tard en 2015, la seule évolution significative de macroporosité concerne le matériau squelette TA/DB/DV. L'augmentation de microporosité montrée précédemment, conjointement à une porosité totale qui n'a pas évolué, explique cette diminution.

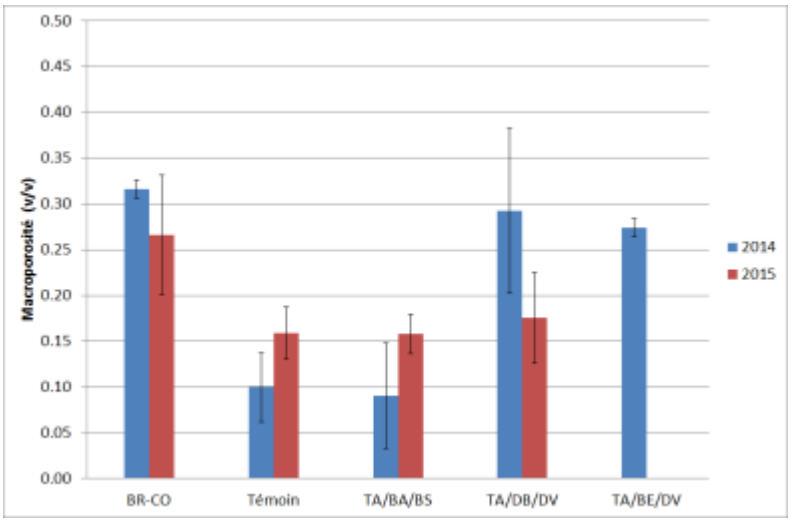


Figure 104. Evolution de la macroporosité des matériaux en 2014 et 2015. Les barres d'erreurs sont des erreurs standard (n=3)

Finalement, les propriétés hydrodynamiques de ces matériaux montrent une capacité d'aération contrastée, ainsi qu'une réserve en eau acceptable.

Bilan sur l'évolution physico-chimique des Technosols construits

Les propriétés des sols construits traduisent, dans leur majorité, un niveau de fertilité à la fois physique et chimique satisfaisant. Les valeurs de pH et leurs évolutions au cours du temps traduisent des conditions favorables à l'activité biologique. La solubilité des nutriments minéraux, dans ces conditions légèrement basiques, peut théoriquement être une limite, contrebalancée par le fait que la CEC soit très élevée. Le caractère carbonaté de la plupart des mélanges peut également constituer un risque de chlorose ferrique qui ne semble marqué que dans le mélange TA/DB/DV ; dans les autres mélanges, les matériaux parents contribution à l'alimentation de la solution du sol en fer. Les concentrations en azote total – même si elles constituent un indicateur partiel de l'azote disponible pour les plantes – correspondent aux besoins de la végétation, en particulier dans le mélange BR/CO. Comme cela a pu déjà être mis en évidence dans le cas des Technosols, le rapport C/N ne peut pas être interprété directement en termes de fonctionnement biologique, comme c'est le cas dans les sols naturels. En effet, il apparaît que les matériaux parents peuvent contenir des formes de matières organiques faiblement dégradables qui conduisent à des valeurs élevées de ce ratio. Les valeurs en phosphore disponible pour les plantes sont moyennes à faibles en fonction des mélanges. Les conditions physiques sont globalement favorables, avec des valeurs de masse volumique apparente faibles (en particulier pour le mélange BR/CO) et des réserves utiles satisfaisantes. Ces paramètres ont connu une légère décroissance au cours du temps, mais dans des proportions ne mettant pas en cause la fertilité physique des sols construits.

VI.2.c. Etat du compartiment Plante

Dispositif lysimétrique du GISFI

Pour la modalité « square et parc », la densité racinaire totale mesurée était de 22,4%. Les racines étaient très largement localisée dans l'horizon BR/CO et de manière seulement marginale dans l'horizon BA/SP (Figure 105).

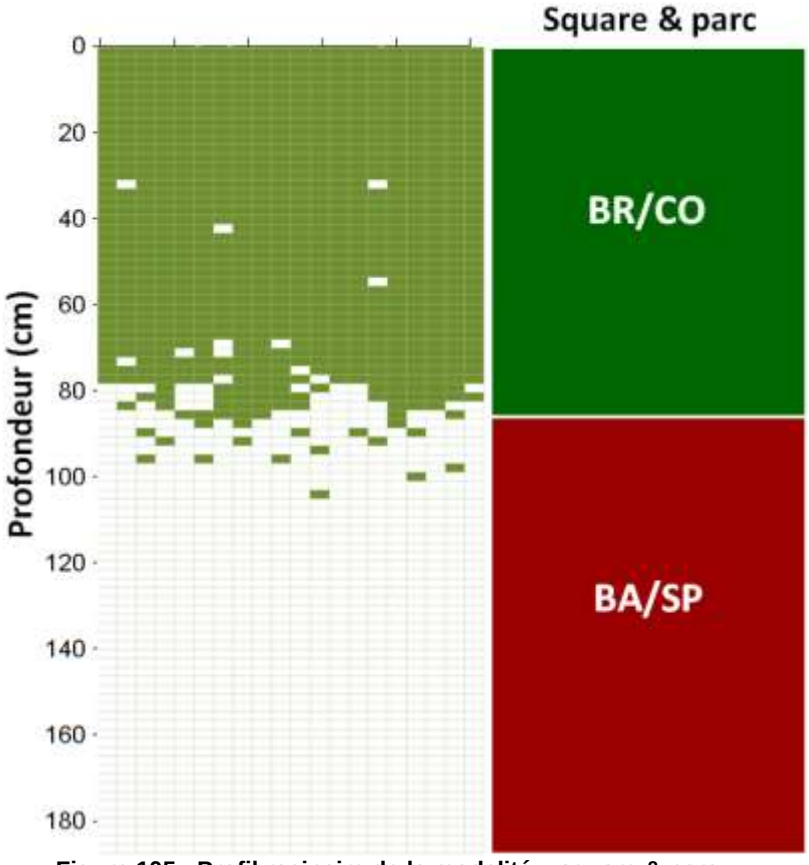


Figure 105 : Profil racinaire de la modalité « square & parc »

Avec, une densité racinaire plus élevée (33%), le sol construit de la modalité « arbre de plantation » présentait un profil racinaire beaucoup plus homogène avec un enracinement significatif jusqu'à 1,45 m. L'horizon BR/CO était totalement occupé par les racines et la densité était élevée, jusqu'au 2/3, dans l'horizon TA/BE/DV à l'exception des zones non enracinée du fait de la présence de blocs de béton (Figure 106).

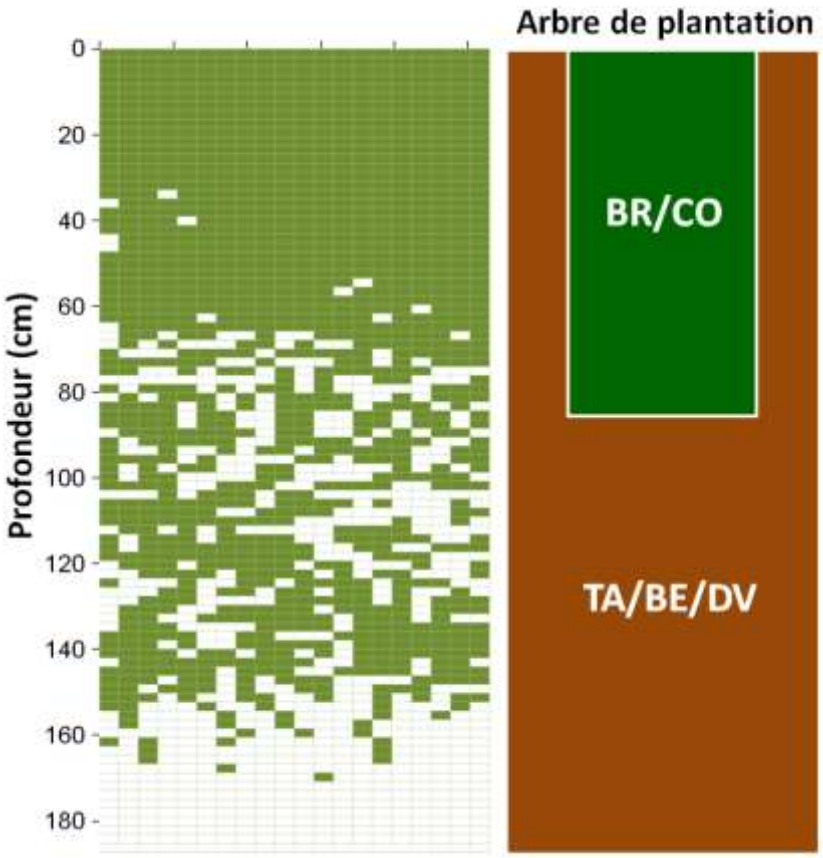


Figure 106 : Profil racinaire de la modalité « arbre de plantation »

Dispositif lysimétrique Agrocampus Ouest

Si la fertilité physico-chimique des matériaux semble favorable à l'installation de végétaux, il est intéressant de le confirmer par l'évaluation de la capacité des végétaux à se développer dans l'ensemble du volume de sol construit. Une description du système racinaire a été réalisée sur les 2 sites de suivi lysimétrique. A Angers, les sols ont été subdivisés en 3 couches de même épaisseur, chacune d'entre elles étant ensuite décomposées en 9 blocs de 15 L. Les racines ont été extraites, lavées puis séchées et pesées. La quantification de la biomasse racinaire a été réalisée 1 et 2 ans après plantation des arbres, en 2014 et 2015.

Au bout d'un an de croissance, les *Acer platanoïdes* ont su explorer l'ensemble du volume de sol construit (Figure 107). De nombreuses racines fines étaient présentes dans la dernière couche de sol des matériaux squelettes. On constate néanmoins une densité de racine plus faible dans le matériau TA/BA/BS (30% de moins que les autres matériaux squelettes). La quantité totale de racines était de 278, 424 et 550 g sec dans les lysimètres contenant les matériaux squelette TA/BA/BS, TA/DB/DV et le témoin, respectivement. Enfin 73 à 80 % de la biomasse racinaire se situait dans le matériau de croissance. La biomasse aérienne était corrélée à la biomasse racinaire, avec des valeurs de 652, 1065 et 1445 g sec dans les lysimètres reposant sur le TA/BA/BS, TA/DB/DV et le témoin, respectivement. Après 2 ans de croissance, en 2015, les dynamiques de croissance ont changé. En effet, c'est le matériau squelette TA/DB/DV qui a la plus forte densité racinaire talonné par TA/BA/BS, alors que le Témoin a la densité la plus faible. La biomasse racinaire était alors de 590, 963 et 1188 g sec dans les lysimètres reposant sur le Témoin, TA/BA/BS et TA/DB/DV, respectivement. Dans le Témoin la dynamique racinaire a donc peu évolué contrairement aux 2 autres matériaux squelettes. La biomasse aérienne en 2015 suit la même tendance que la biomasse racinaire. Elle s'établit à 1594, 3625 et 3073 g sec pour le Témoin, TA/BA/BS et TA/DB/DV, respectivement. Nous avons également observé que le matériau squelette TA/BA/BS prédispose les arbres à une plus grande ramification.

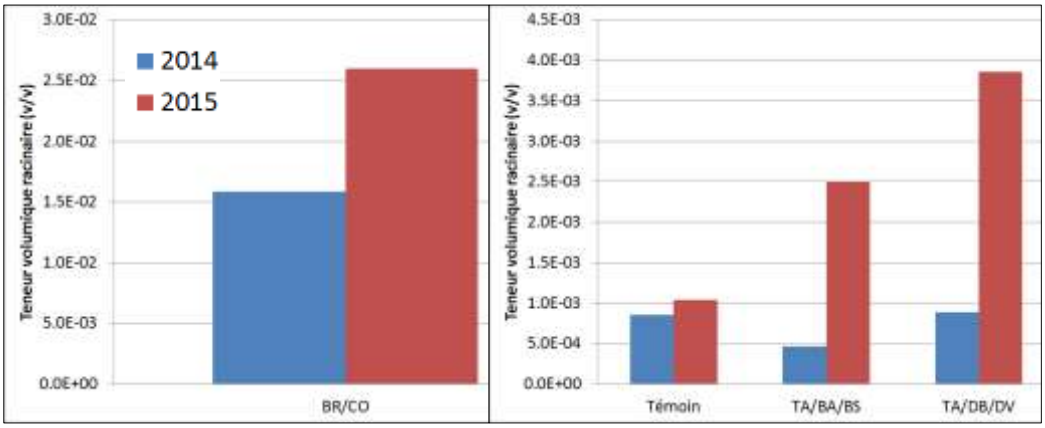


Figure 107. Distribution de la biomasse racinaire (teneur volumique) des Acer platanoïdes dans le matériaux de croissance (à gauche) et dans les matériaux squelette (à droite) en fonction de la profondeur (lysimètres d'Angers)

Ces résultats, même s'il n'y a pas de répétitions (et donc pas de comparaison possible entre lysimètres), permettent de tirer un certain nombre de recommandations ou de préconisations. Tout d'abord, les caractéristiques hydrodynamiques satisfaisantes présentées précédemment montrent qu'elles favorisent la croissance des végétaux. Toutefois, certaines contraintes ont été observées. Même si la macroporosité est faible dans les matériaux squelettes Témoin et TA/BA/BS, la croissance racinaire ne semble pas affectée. En 2014, le faible développement racinaire dans TA/BA/BS a été la conséquence d'une mauvaise capacité d'évacuation des eaux de drainage du lysimètre. Quelques tâches d'oxydo-réduction confirment cette hypothèse. Le faible développement de l'arbre dans le Témoin est la conséquence d'un pH trop acide (autour de pH 4,4). Un autre point de vigilance porte sur le choix du matériau organique à introduire dans les matériaux squelettes. Il est préférable en effet de choisir un matériau composté afin d'éviter, comme pour le déchet vert (TA/DB/DV) de subir une décomposition ayant pour conséquence une diminution de la macroporosité.

VI.2.d. Flux = état du compartiment Eau

Dispositif lysimétrique du GISFI

Bilan hydrique

Le volume cumulé de précipitations au cours de la période de suivi est de 1929 mm. Les flux par drainage (évacuation d'eau à la base du sol) ont été mesurés et ceux par évapotranspiration ont été calculés (par déduction, en intégrant les variations de masse) (Figure 108). Il apparaît que l'évapotranspiration est du même ordre de grandeur pour les deux modalités, mais néanmoins significativement plus élevée pour la modalité square et parc (1668 contre 1488 mm pour la modalité arbre de plantation). Ceci est cohérent avec le meilleur développement de la biomasse qui a été mesuré sur ce lysimètre. Les flux par drainage sont très similaires pour les deux modalités : 492 mm pour « square et parc » et 464 mm pour « arbre de plantation ». Dans les deux cas, il est intéressant de noter que le flux ne débute pas juste après la mise en place, mais qu'une période d'équilibrage de quelques mois est nécessaire : jusqu'à fin décembre pour « square et parc » et jusqu'à début février pour « arbre de plantation ». Dans les deux cas, il apparaît que l'eau est drainée essentiellement au cours des périodes 2 décrites dans la section précédente.

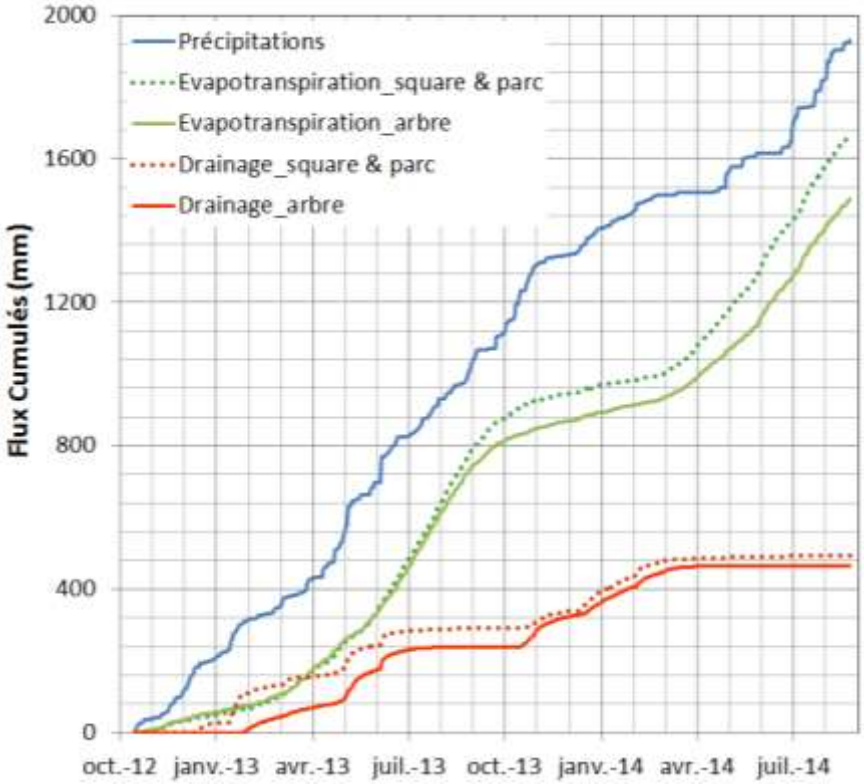


Figure 108 : Courbes cumulées des précipitations, de l'évapotranspiration et du drainage exprimées en mm pour les deux modalités de sol construit

Concentrations en Carbone Organique Dissous

Le COD pour la modalité « square et parc » varie essentiellement entre 500 et 1500 mg.L^{-1}, à l'exception d'un pic le 20/06/13 (250 L .m^{-2}) (Figure 109). Ces valeurs sont beaucoup plus élevées que celles mesurées lors des tests de lixiviation (voir rapport 36 mois). Pour la modalité « arbre de plantation », il est plus faible, entre 100 et 430 mg.L^{-1}. Elles sont globalement comparables à celles mesurées lors des tests de lixiviation.

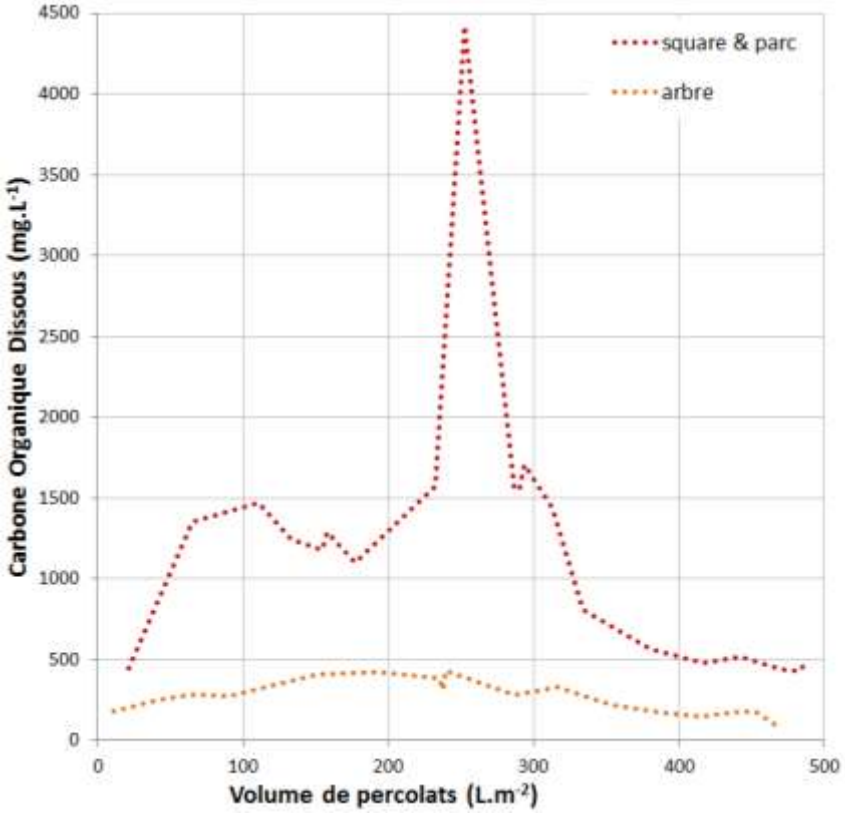


Figure 109 : Evolution du COD des percolats des deux modalités de sols construits

Concentrations en ions majeurs

Pour la modalité « square et parc », après une courte phase initiale d'augmentation des concentrations en ions, la tendance générale est celle d'une légère baisse au cours du temps (Figure 110). Dans le détail, ce sont les sulfates (de 1500 à 3900 mg.L^{-1}) et dans une moindre mesure les chlorures (de 500 à 2150 mg.L^{-1}) qui dominent parmi les anions. Il est à noter une nouvelle augmentation des concentrations en sulfates à partir de 310 L.m^{-2} et une percée de nitrates (jusqu'à 1230 mg.L^{-1} à 470 L.m^{-2}). Après une phase identique d'augmentation des quantités en solution, les tendances d'évolution des concentrations de tous les cations sont globalement similaires. Depuis le potassium (de 1870 à 1000 mg.L^{-1}), au magnésium (de 540 à 200 mg.L^{-1}), en passant par le calcium (de 1620 à 250 mg.L^{-1}) et le sodium (de 1120 à 320 mg.L^{-1}), leurs concentrations décroissent lentement au cours du temps.
Dans le cas de la modalité « arbre de plantation », la tendance générale est plutôt stable excepté une nette augmentation des concentrations en sulfate à partir de 300 L.m^{-2} jusqu'à atteindre 3600 mg.L^{-1} à la fin du monitoring et une baisse lente et continue pour les chlorures et el calcium. Globalement, les gammes de concentrations sont plus faibles que pour la modalité précédente.
Ces résultats sont logiquement cohérents avec les mesures de conductivité électrique précédemment présentés.

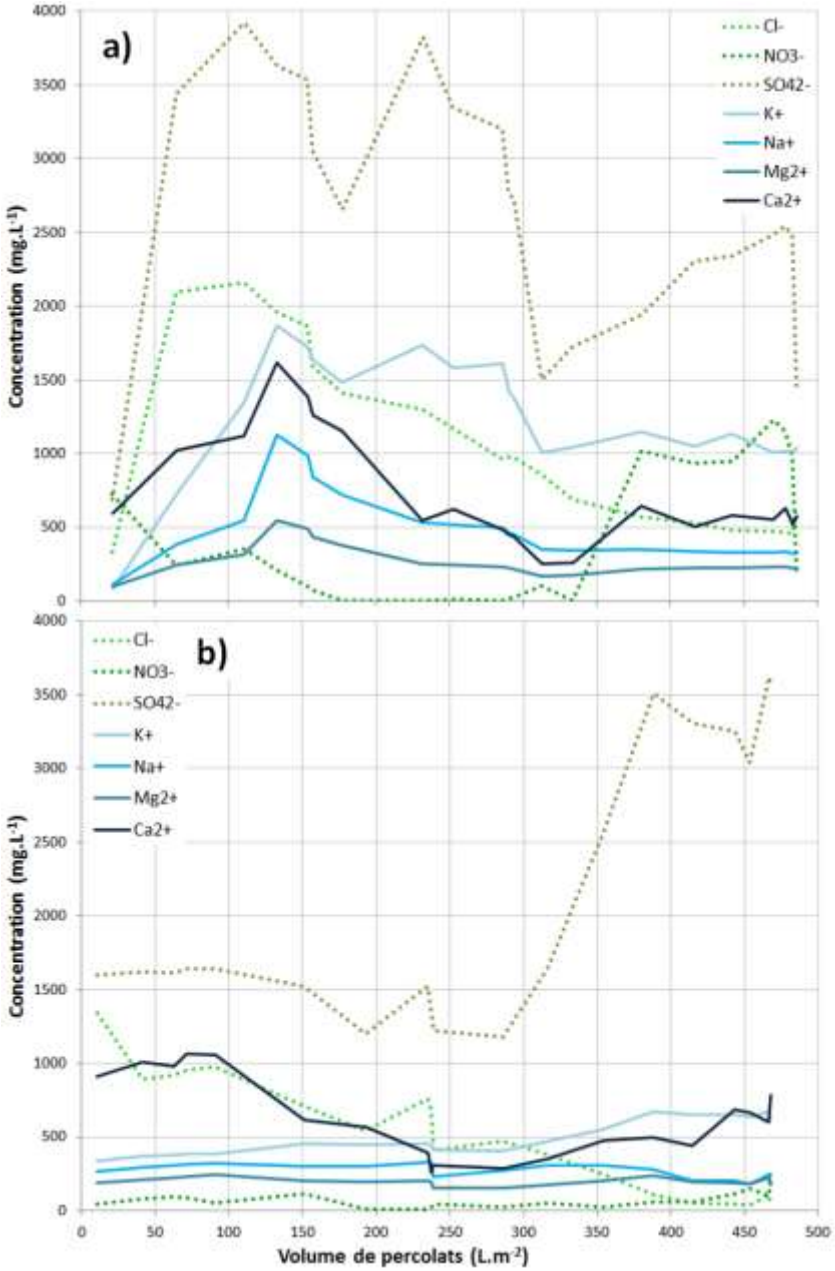


Figure 110 : Evolution des concentrations en ions majeurs en fonction du volume de percolats a) modalité « square et parc » et b) la modalité « arbre de plantation »

Pour la modalité « square et parc » les concentrations les plus élevées qui ont été mesurées sont pour le Zn, en particulier en début (jusqu'à 2,70 mg.L^{-1}) et en fin d'expérimentation (jusqu'à 0,35 mg.L^{-1}) ; entre ces

valeurs extrêmes, les concentrations sont faibles (> 0,10 mg.L^{-1}) (Figure 111). La dynamique de l'arsenic est différente puisque les concentrations augmentent légèrement depuis 0,03 jusqu'à 0,3 mg.L^{-1} à 300 L.m^{-2}. Pour les autres éléments, les concentrations sont faibles (≥ 0,15 mg.L^{-1}) et globalement décroissante dans le temps.

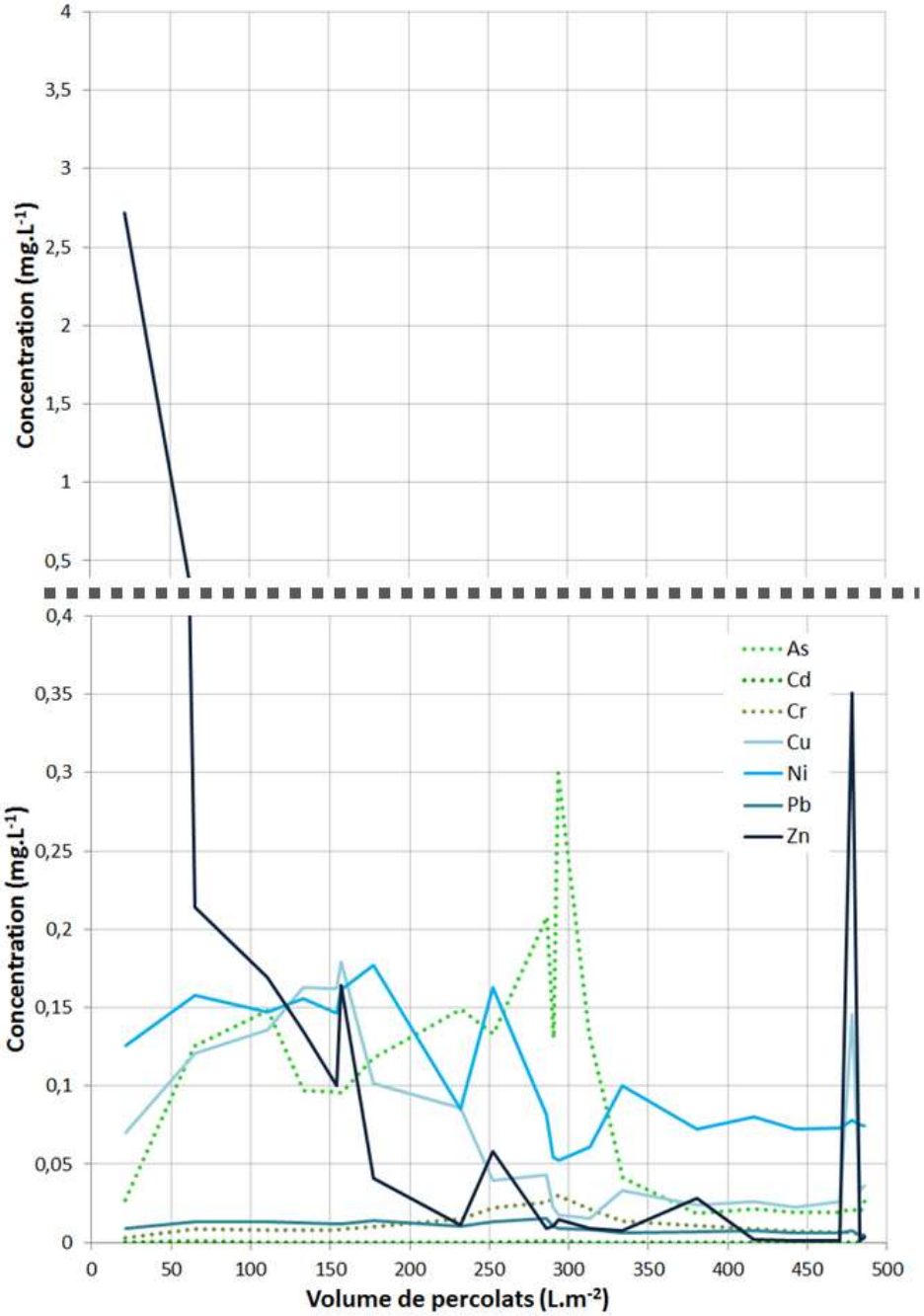


Figure 111 : Evolution des concentrations en éléments traces métalliques en fonction du volume de percolats pour la modalité « square et parc »

Pour la modalité « arbre de plantation » la dynamique du Zn est similaire avec une concentration élevée en début et en fin de suivi (jusqu'à 3,92 mg.L^{-1}), mais entre ces deux évènements les concentrations mesurées sont très faibles (> 0,05 mg.L^{-1}) (Figure 112). Les concentrations des autres éléments sont globalement significativement plus faibles que pour la modalité « square et parc » (≥ 0,05 mg.L^{-1}) et globalement constante dans le temps.

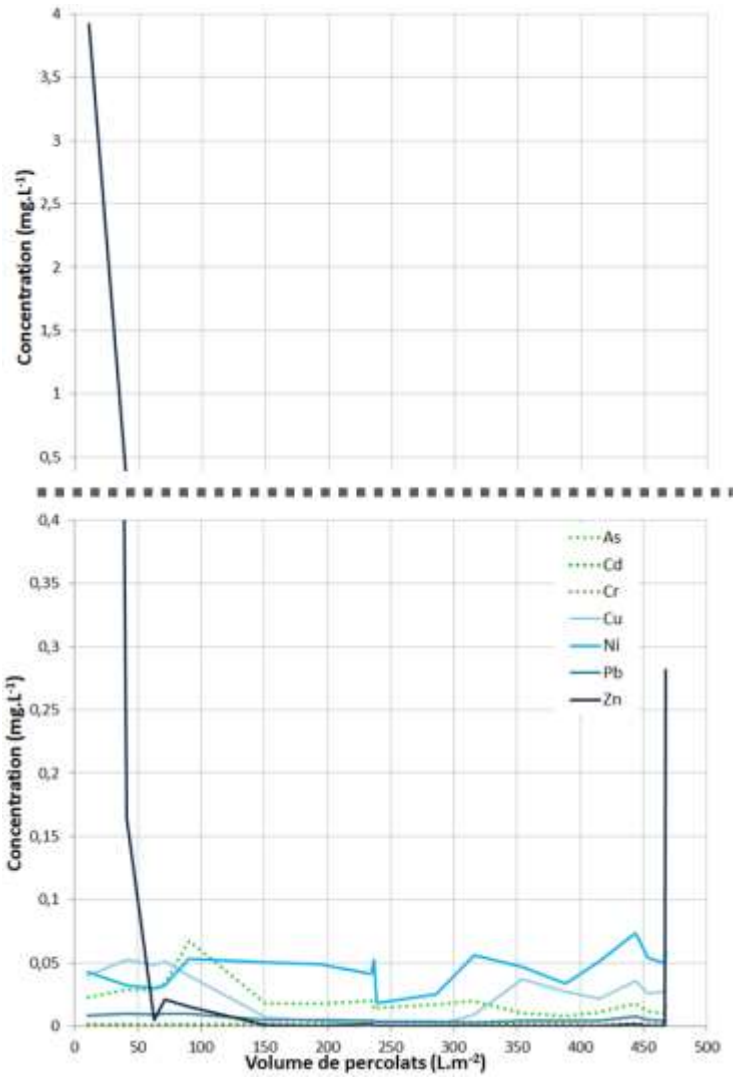


Figure 112 : Evolution des concentrations en éléments traces métalliques en fonction du volume de percolats pour la modalité « arbre de plantation »

Flux en ions majeurs

Des calculs et des mesures de flux ont été effectués afin de déterminer les quantités d'éléments présents initialement dans les matériaux parents et ayant été évacués de chaque profil (sous forme solide ou liquide). Deux méthodes ont été comparées :

- Le calcul, à partir des concentrations mesurées dans les mélanges initiaux et dans les échantillons prélevés au moment du démantèlement, ainsi que des épaisseurs et masse volumique apparente, de stocks d'éléments dans l'ensemble de chaque profil ;
- Le calcul, à partir des concentrations mesurées et des volumes drainés dans les percolats collectés au cours du monitoring des lysimètres, de flux par éléments.

Seule la modalité « square & parc » a fait l'objet de ce travail (Tableau 65).

Il apparaît en premier lieu que la première méthode, si elle permet d'estimer l'importance du stock en éléments n'est pas adaptée à des calculs de flux. En effet, les imprécisions de mesure à la fois sur l'épaisseur de chaque couche, sur la masse volumique apparente, mais également sur la concentration en phase solide aboutissent à des résultats incohérents. En effet, les stocks augmentent ou diminuent dans des proportions irréalistes.

A l'inverse, la seconde méthode semble assez fiable considérant que l'estimation des volumes est très précise (débitmètre à auget) et que l'imprécision des analyses en phase liquide est normalement plus faible que sur celles en phase solide.

Ainsi, il apparaît que 0,6% du magnésium présent dans le sol a été lixivié. Les pertes par drainage sont plus faibles (de l'ordre de 0,1 %) pour le calcium (dont le stock est très élevé) et pour le fer (de l'ordre de 0,01%). Les flux les plus importants ont été relevés pour le sodium (de l'ordre de 2,2%) et pour le potassium (3,5%).

Tableau 65. Evolution du stock calculé et flux mesurés en éléments majeurs pour la modalité "square & parc"

		Ca	Na	K	Mg	Fe	Sulfates
		kg.m^{-2}					
stock (analyses / solide)	t_0	367	10,9	18,3	21,7	75,3	n.d.
	t_{2ans}	372	9,93	16,1	19,7	66,5	n.d.
flux (analyses / percolats)		0,36	0,23	0,61	0,13	0,01	1,37

n.d. : non déterminé

Flux en éléments traces métalliques

Les mêmes méthodes que précédemment ont été appliquées, avec les mêmes limites (Tableau 66). Les flux sont, dans tous les cas de figure, plus faibles que pour les éléments majeurs, malgré des stocks (exprimés ici en g.m^{-2}) beaucoup plus faibles. Voici le classement dans l'ordre croissant avec les pourcentages de flux par rapport aux stocks estimés : As (0,17%) > Ni (0,13%) > Zn (0,03%) > Cd (0,02%) > Cr = Pb (0,01%).

Tableau 66. Evolution du stock calculé et flux mesurés en éléments en traces pour la modalité "square & parc"

		As	Ba	Cd	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Zn
		g.m^{-2}										
stock (analyses / solide)	t_0	25,8	363	0,69	90,0	219	5,68	38,4	61,5	9,23	2,25	334
	t_{2ans}	31,5	330	0,45	88,0	207	5,14	40,3	58,4	9,08	3,90	302
flux (analyses / percolats)		0,05	n.d.	> 0,01	0,01	0,04	n.d.	0,05	0,01	n.d.	n.d.	0,09

n.d. : non déterminé

VI.3. Impacts sur les composantes de l'environnement

VI.3.a. Comparaison avec les limites de qualité des eaux

En l'absence de réglementation sur l'évaluation de l'impact environnemental de sols construits, nous avons, à titre de comparaison et dans une logique d'exigence maximale, comparé la qualité des eaux de drainage collectés à la base des lysimètres avec les limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine et des eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. Cette comparaison a évidemment des limites car les sols construits ne seront théoriquement pas en contact direct avec une nappe souterraine et les eaux de drainage ne seraient en aucune mesure destinées à la consommation humaine.

Cette comparaison fait apparaître deux éléments :

- Les concentrations mesurées en éléments traces métalliques sont compatible avec l'exigence de qualité « eaux brutes », à l'exception de quelques valeurs en arsenic pour la modalité « square & parc » ; des dépassements sont néanmoins observées par rapport à la limite pour les eaux potables pour l'arsenic, le nickel et dans une moindre mesure pour le plomb.
- Les concentrations mesurées en éléments majeurs apparaissent supérieures aux limites de qualité eaux brutes, de manière systématique pour les sulfates, quasi-systématiques pour les chlorures et fréquentes pour les nitrates et l'arsenic.

En résumé, ces résultats révèlent que les sols construits ne génèrent, au regard des éléments qui ont été analysés, aucun risque sanitaire par transfert vers la nappe, mais pourraient néanmoins contribuer à une dégradation de la qualité chimique de ressources en eaux souterraines proches de la surface (ressources qui sont très rarement exploitées en milieu urbain). Néanmoins, cette assertion devrait être comparée aux contributions des autres matériaux utilisés en aménagement urbain (béton, bitume, réseaux enterrés) dont les impacts sont peu étudiés.

Tableau 67. Comparaison de la qualité des eaux de drainage avec les valeurs seuils réglementaires

		chlorures	sulfates	nitrates	Na	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine		pvl	pvl	50	pvl	0,005	0,005	0,050	2,000	0,020	0,010	pvl
Limites de qualité des eaux brutes		200,0	250,0	100,0	200,0	0,100	0,005	0,050	pvl	pvl	0,050	5,00
"square & parc"	valeur moyenne	1045,8	2645,8	396,5	486,0	0,093	< 0,0001	0,012	0,072	0,104	0,010	0,19
	min	329,2	692,7	0,4	114,5	0,019	< 0,0001	0,003	0,016	0,052	0,005	0,00
	max	2159,3	3920,0	1230,2	1124,0	0,300	0,0011	0,030	0,180	0,177	0,016	2,72
"arbre"	valeur moyenne	511,4	2139,8	74,9	271,9	0,020	< 0,0001	0,002	0,024	0,045	0,006	0,23
	min	41,8	1179,5	10,8	179,0	0,008	< 0,0001	0,001	0,000	0,018	0,003	0,00
	max	1339,4	3622,3	272,1	329,9	0,068	< 0,0001	0,003	0,053	0,074	0,010	3,92

VI.3.b. Exploitation des caractérisations écotoxicologiques

L'évaluation des effets écotoxiques a été réalisée à différentes échelles au cours de cette étude. Ainsi, les matériaux ont été étudiés individuellement puis les essais ont été menés sur certains mélanges et enfin sur des échantillons des sols issus des lysimètres. Selon les matrices étudiées, les essais peuvent être différents.

Les différentes méthodes ont été présentées précédemment.

Les essais d'écotoxicité terrestres ont été réalisés sur les couches supérieures des lysimètres, dans les zones où les plantes et les vers de terre évoluent. Les essais d'écotoxicité aquatique ont été réalisés à différentes profondeurs.

Ecotoxicité terrestres

Sur chacune des figures sont représentés, sur la partie gauche, les résultats obtenus sur les matériaux et les mélanges frais et, sur la partie droite, les résultats d'écotoxicité du ou des échantillons prélevés dans un ou les deux lysimètres (les profondeurs de prélèvement sont indiquées dans les légendes des graphiques). Les résultats présentés sur les matériaux bruts correspondent environ aux proportions auxquelles ces matériaux ont ensuite été mélangés (les proportions des résultats présentés sont entre parenthèse dans les légendes. En effet les proportions réelles dans les mélanges n'étaient pas connues lors de la réalisation des essais sur les matériaux seuls.
Sur chaque figure le trait violet continu représente le seuil de significativité biologique (SSB) de chacun des essais d'écotoxicité. Ainsi, si l'effet mesuré avec l'échantillon testé est supérieur à cette valeur seuil, cela signifie que l'effet est considéré comme écotoxique.

Brique (BR), Compost de boue (CO), mélange BR/CO (Figure 113)

Sur la figure A, on observe que les échantillons présentent une écotoxicité importante, quel que soit l'indicateur biologique exposé (toutes les valeurs sont supérieures aux SSB respectives).
Après maturation en lysimètre (figure B), on observe que les effets sur les végétaux sont bien inférieurs à ceux mesurés sur les matériaux à des concentrations équivalentes ou à ceux mesurés sur le mélange frais. Les mesures indiquent même une stimulation de la croissance de l'orge et du cresson pour le mélange qui était dans le L19. Cependant, les effets d'évitement vis à vis des vers de terre sont toujours très importants.

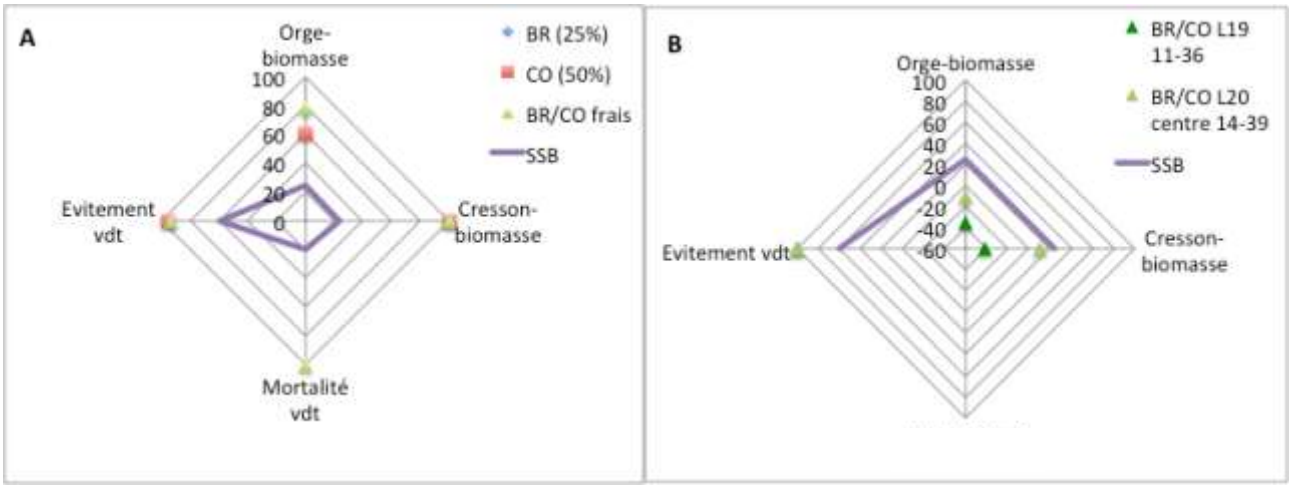


Figure 113 : Ecotoxicité du mélange BR/CO sur les bioindicateurs terrestres

Terre acide (TA), béton (BE), déchets verts (DV) et mélange TA/BE/DV (Figure 114)

Les effets écotoxiques de TA et de DV sont faibles, excepté vis à vis du cresson, plante connue pour être particulièrement sensible. Les effets mesurés sur le mélange "frais" sont eux plus importants vis-à-vis de tous les bioindicateurs testés. Ainsi, par exemple, alors que les vers de terre présentaient une forte attirance vis-à-vis de TA et de DV ("-80%" d'évitement) ils évitent à près de 40% le mélange, la présence du béton en est sans doute à l'origine.

La figure B présente les résultats obtenus sur l'échantillon prélevé dans la couronne du lysimètre. On observe que le mélange accentue le comportement d'évitement des vers de terre qui passe de 40% sur le mélange frais à 100% dans l'échantillon issu du lysimètre. Par contre, sur les végétaux, les effets observés sont moins importants même si, vis-à-vis du cresson, l'effet écotoxique est toujours significatif.

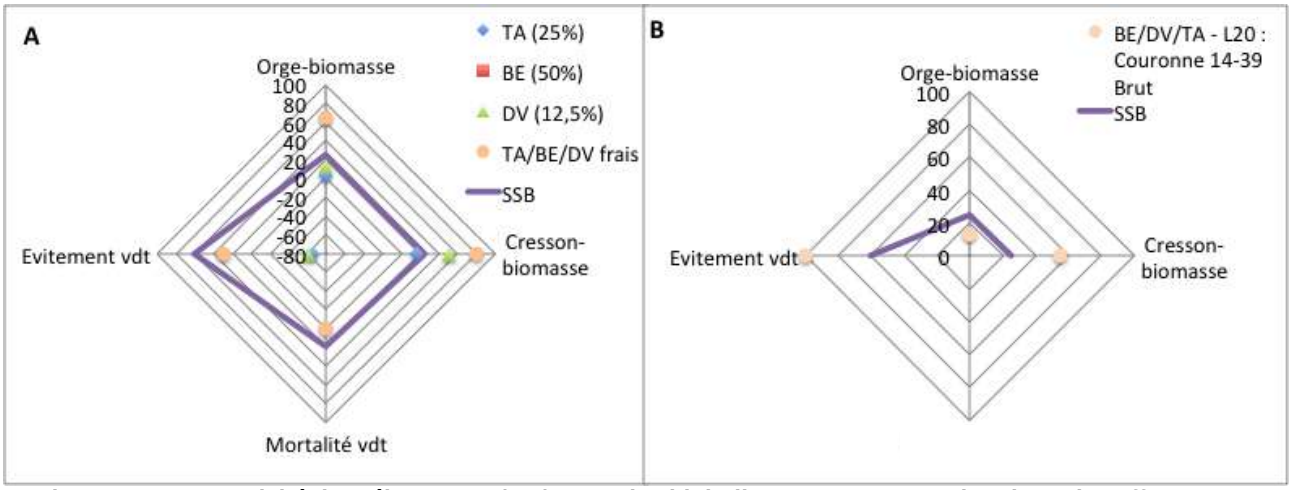


Figure 114 : Ecotoxicité du mélanges BE/DV/TA sur les bioindicateurs terrestres (partie A : les effets écotoxiques du BE n'ont pas été évalués sur les indicateurs terrestres)

Sous-produit papetier (SP), ballast (BA) et mélange BA/SP (Figure 115)

Le mélange ayant été placé à une profondeur importante dans les lysimètres, aucun essai d'écotoxicité terrestre n'a été réalisé sur un échantillon issu des lysimètres (un essai sur les risques que présenteraient les lixiviats sur les lentilles d'eau est présenté ci-après).
On observe que les effets du SP et du mélange frais sont du même ordre ce qui signifie le fort impact du matériau SP dans le mélange (le matériau a été introduit à hauteur de 66% et les résultats présentés correspondent à un mélange contenant 50% de SP avec un substrat de référence). Ce mélange entraine des inhibitions significatives de croissance des deux plantes exposées. Les effets sur les vers de terre sont soient nuls (le mélange BA/SP n'entraine aucune mortalité) soient les produits (SP et mélange BA/SP) attirent très significativement les vers (respectivement -85 et -80% d'évitement).

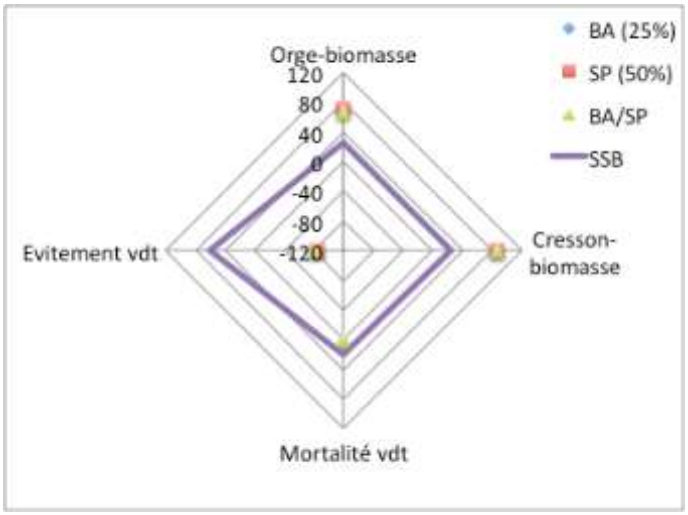


Figure 115 : Effets du mélange BA/SP sur les bioindicateurs terrestres

Focus sur la comparaison des effets écotoxiques entre les mélanges frais et les échantillons issus des lysimètres (Figure 116)

L'écotoxicité du mélange BR/CO a fortement diminué et, dans la majorité des cas, on observe même la stimulation des paramètres étudiés (% d'inhibition négatif). Il faut cependant noter que les effets sur l'évitement des vers de terre est toujours aussi important.
Pour le mélange TA/BE/DV, l'évolution tend aussi vers une diminution de l'écotoxicité mais de manière moins nette que pour le mélange BR/CO. En effet, on observe que, même si la germination semble stimulée quand les mélanges ont maturé dans les lysimètres, les échantillons prélevés dans ces derniers entrainent toujours une inhibition de croissance, plus importante pour le cresson que pour l'orge. Les effets sur l'évitement des vers de terre ont, quant à eux, augmenté.

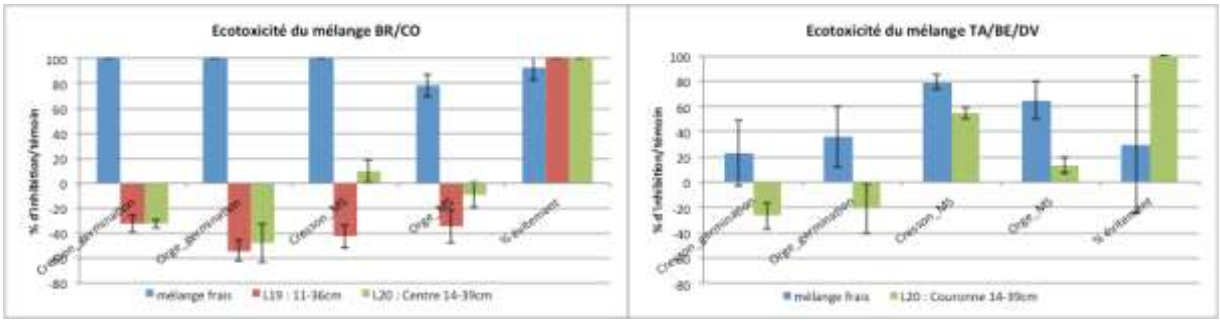


Figure 116 : Phytotoxicité des mélanges frais et des échantillons des prélevés dans les deux lysimètres sur l'orge et le cresson.

Focus sur les effets phytotoxiques des échantillons issus des lysimètres (Figure 117)

Le mélange BR/CO n'entraine pas les mêmes effets quand celui est seul dans le lysimètre (L19 à gauche du graphique) ou quand il est entouré par le mélange BE/DV/TA dans le L20 (à droite du graphique). Dans le premier cas, le mélange entraine une importante augmentation de la production de biomasse de l'orge et du cresson alors que dans le second cas on mesure une faible stimulation de la croissance de l'orge et une légère inhibition de croissance du cresson. Deux hypothèses sont envisageables : un transfert d'éléments écotoxiques du mélange BE/DV/TA vers le mélange BR/CO et/ou une meilleure stabilisation du mélange BR/CO dans le L19 (en effet on avait constaté que le mélange frais entrainait une forte réduction de la croissance du cresson et de l'orge, cf. Figure 113). Dans les deux cas, l'environnement du mélange BR/CO n'a pas été le même au sein des deux lysimètres ce qui a entrainé une modification de son évolution au cours du temps.

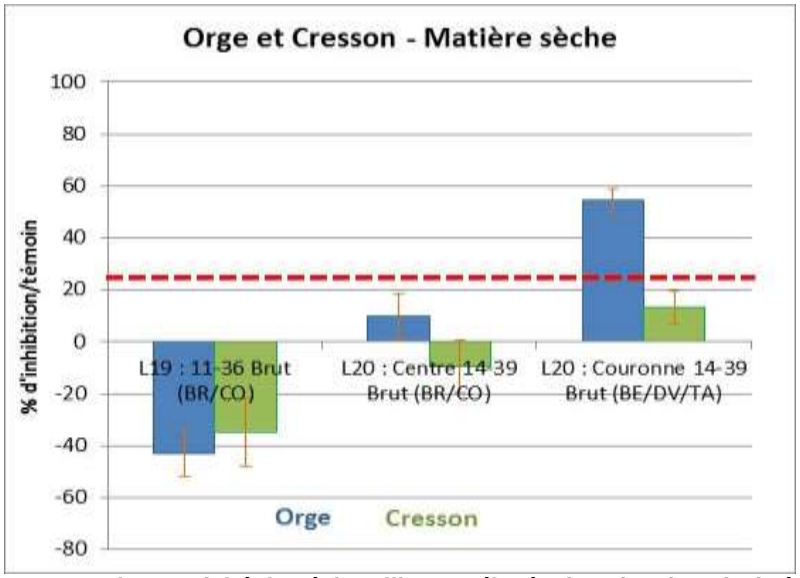


Figure 117 : Phytotoxicité des échantillons prélevés dans les deux lysimètres sur l'orge et le cresson (biomasse).

Bilan

Il s'avère que les essais réalisés sur les matériaux semblent relativement prédictifs de l'évolution de l'écotoxicité du mélange frais (en respectant les proportions dans le mélange). Ceci est en effet très net pour le compost (CO) et les sous-produits papetiers (SP), mais cela reste à vérifier sur les matériaux du type Béton (BE) et Ballast (BA) dont l'écotoxicité terrestre n'avait pas été évaluée.

La maturation des mélanges dans les lysimètres a, dans la plupart des cas, diminué l'écotoxicité des mélanges frais. Ainsi, les mesures faites sur la germination et la croissance de l'orge et du cresson indiquent que les risques pour les écosystèmes terrestres sont acceptables. Les effets sur le comportement des vers de terre sont quant à eux très négatif puisque 100% des vers évitent les mélanges, préférant le substrat de référence pour les deux mélanges prélevés en surface dans les deux lysimètres : BR/CO et TA/BE/DV.

D'autre part, on note que l'évolution de l'écotoxicité des mélanges est influencée par leur environnement ce qui, dans le cas du mélange BR/CO, s'est traduit par une diminution moins importante de sa phytotoxicité quand il s'est trouvé au contact du mélange TA/BE/DV

Ecotoxicité aquatique

Sur les échantillons issus des lysimètres, seuls les effets sur les lentilles d'eau (*Lemna minor*) ont été évalués. Les résultats présentés concernent seulement l'écotoxicité mesuré dans les lysimètres avec un rappel sur les mesures effectués sur le mélange frais (Figure 118). On remarque ainsi que, pour tous les échantillons, l'écotoxicité vis à vis des lentilles d'eau a augmenté, sans que celle-ci soit significative (tous les résultats sont inférieur au seuil de significativité de 25%). D'autre part, l'évolution de l'écotoxicité en fonction de la profondeur n'est pas très importante excepté pour l'échantillon BA/SP prélevé à 90cm de profondeur qui présente l'écotoxicité la plus forte. A cet endroit, il s'avère que le mélange BA/SP est très compact, bloquant peut-être les écoulements vers des couches plus profondes.

Il s'agit ici des résultats obtenus pour un lixiviat qui se diluerait à 50% dans les eaux de surface ce qui est une hypothèse très discriminante, la dilution sera dans les faits beaucoup plus importante.

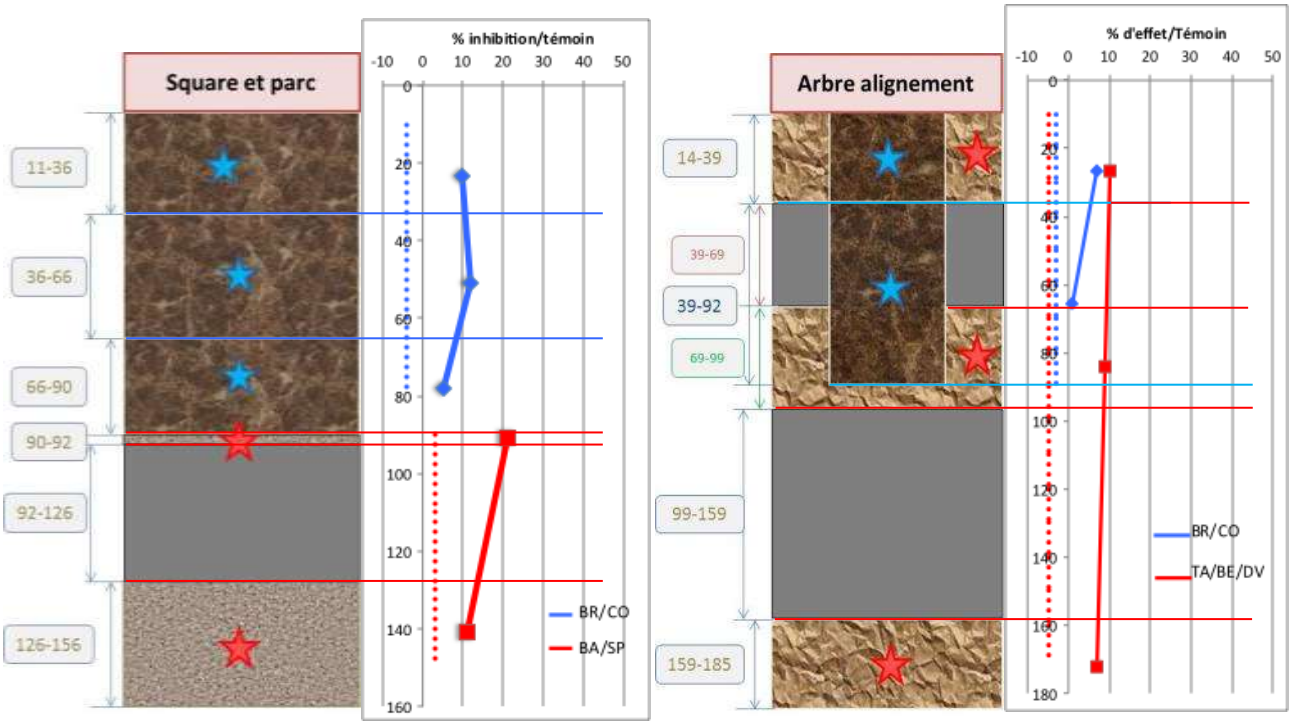


Figure 118 : Représentation graphique des profondeurs de prélèvement (à gauche) et des résultats d'écotoxicité aquatique en fonction de la profondeur (à droite) pour le lysimètre L19 (square et parc) et le lysimètre L20 (arbre d'alignement)

NB. (i) les étoiles indiquent les zones de prélèvements, (ii) les lignes pointillées correspondent à l'écotoxicité mesurée sur les mélanges "frais" , (iii) les lignes pleines correspondent à l'écotoxicité de chaque prélèvement effectué dans les lysimètres. Les résultats présentés correspondent à un lixiviat dilué à 50%.

Bilan

Il apparaît que l'écotoxicité des lixiviats a été augmentée lors de la maturation des mélanges. Les niveaux d'écotoxicité mesurés vis à vis des lentilles d'eau restent cependant non préoccupants. Un complément d'information pourrait être apporté si l'écotoxicité des percolâts récoltés à la base des lysimètres pouvait être directement mesurée.

VI.4. Fonctionnement des sols construits

VI.4.a. Circulation et rétention de l'eau

Infiltration et circulation de l'eau

La fonction « filtre » des Technosols construits est évaluée à travers leur capacité à contribuer significativement au réapprovisionnement des nappes souterraines. Le suivi en lysimètre a permis de démontrer que, sous climat océanique dégradé, 26% des précipitations étaient drainées hors du profil de sol construit. Par ailleurs, les mesures portant sur le volume occupé par la macroporosité – principale contributrice des écoulements au sein des sols – ont démontré que celle-ci était élevée dans les mélanges étudiés. De plus, ce volume de porosité gravitaire garantissant à la fois l'aération des sols et l'infiltration de l'eau lors d'épisodes pluvieux de forte intensité, a faiblement évolué au cours du temps.

Rétention de l'eau dans la porosité du sol

Les résultats obtenus sur la capacité des différents mélanges à assurer la fonction de stockage d'eau utile pour les plantes ont permis de démontrer que celle-ci était remplie de manière satisfaisante. Il est apparu en particulier que la réserve utile des Technosols construits SITERRE était supérieure à celle du mélange terre-pierre témoin utilisé en routine par la Ville d'Angers.

VI.4.b. Cycle biogéochimique des éléments

L'évaluation de la capacité des Technosols construits à assurer le recyclage et la rétention d'éléments repose, dans le cadre du projet SITERRE, sur les aspects « perte d'éléments par drainage » qui peuvent notamment être reliés à la partie du rapport relative à la pédogenèse (un peu plus loin dans la suite de cette partie). Il en ressort qu'une fraction minoritaire des éléments contenus dans les matériaux parents a été lixiviée au cours des deux ans de suivi *in situ* de ces sols (entre 0,01% et 3,5% pour les éléments majeurs ; entre 0,01% et 0,37% pour les éléments traces métalliques).
Il est à noter que le dispositif expérimental – en particulier le protocole d'échantillonnage – n'avait pas été conçu pour évaluer l'évolution du stock de matières organiques dans les Technosols construits. Par conséquent, il est complexe d'interpréter les résultats antagonistes obtenus entre les deux sites expérimentaux (augmentation du stock de carbone organique sur le site GISFI et diminution sur le site Agrocampus Ouest). Cet aspect mériterait d'être exploré davantage.

VI.4.c. Stabilité physique

Maintien contre l'érosion

La stabilité structurale est la capacité d'un sol à conserver l'arrangement de sa phase solide et sa porosité lorsqu'il est soumis à différentes contraintes qui peuvent être de différentes natures et intensités. Elle correspond à la résistance opposée par les agrégats à toute action tendant à les dégrader ou à les détruire et elle joue un rôle important dans la fertilité du sol car elle influence ses propriétés physiques (aération, circulation de l'eau, perméabilité), chimiques (échanges ioniques, séquestration du carbone) et biologiques (activités des microorganismes, croissance racinaire). La stabilité structurale des sols dépend des agents physiques, chimiques et biologiques et surtout de la nature des matières organiques comme nous l'avons montré au cours de cette étude. Le test de laboratoire a permis la formation à court terme d'agrégats moyennement stable avec les déchets verts et la terre acide (MWD 1,2 mm) et instable avec le compost et la terre acide (MWD 0,4 mm). Donc le déchet vert limite les risques de ruissellement et d'érosion en fonction des paramètres climatiques et topographiques (Tableau 68). Après 24 mois en lysimètre, les facteurs climatique et temps ont permis la formation d'agrégats très stables entre le compost et la brique.

Tableau 68 Classe de stabilité, battance et érosion en fonction de valeurs du diamètre moyen pondéral après désagrégation MWD) d'après Le Bissonnais et Le Souder (1995)

MWD	Stabilité	Battance	Ruissellement et érosion diffuse
< 0.4 mm	Très instable	Systématique	Risque important et permanent en toutes conditions topographiques
0,4 - 0,8 mm	Instable	Très fréquente	Risque fréquent en toute situation
0,8 - 1,3 mm	Moyennement stable	Fréquente	Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques
1,3 - 2,0 mm	Stable	Occasionnelle	Risque limité
> 2,0 mm	Très stable	Très rare	Risque très faible

Donc les mélanges formés à partir de déchets minéraux et organiques présentent un processus d'agrégation précoce qui se maintient à long terme et permet au sol construit de résister aux phénomènes de ruissellement et d'érosion.

VI.4.d. Support des activités humaines (support d'infrastructures de voierie)

Pour rappel dans cette partie énonçant les fonctions de ces sols, les horizons squelette offrent une fonction de support de voierie légère (piétonne, circulation douce, parking voiture).

De par leur conception, ils ne font pas l'objet d'évolution sensible à court terme de leurs propriétés mécaniques. Ils n'ont ainsi pas été davantage étudiés dans le cadre de cette tâche dédiée à l'évolution des sols.
Pour le détail des propriétés mécaniques de chaque mélange, se référer donc à la partie V de ce rapport.

VI.4.e. Support de végétation

Nous avons vu dans la partie IV.3 que les matériaux de croissance et squelettes favorisent le développement racinaire dans l'ensemble du volume de sol disponible. Nous apportons ici des éléments nouveaux sur le développement aérien des végétaux.

Végétation herbacée

La végétation herbacée (*Lolium perenne*) a été étudiée sur le site lysimétrique d'Homécourt (surface de 0.5 m^2). Après 2 ans de développement, la biomasse totale produite s'élevait à 80 et 60 g sec m^{-2} dans le matériau de croissance BR/CO et dans le matériau squelette TA/BE/DV, respectivement. Les 2 matériaux sont donc aptes à produire de la biomasse végétale, même si le matériau squelette a permis un développement de biomasse 25% inférieur au matériau de croissance.

Végétation ligneuse arborée

Le développement aérien des arbres (*Acer platanoïdes*) sur le site lysimétrique d'Angers est corrélé à la croissance racinaire. Les figures qui suivent présentent la biomasse aérienne totale en 2014 et 2015 (soit 1 et 2 ans après plantation), ainsi que l'ordre de ramification des arbres en 2015 :

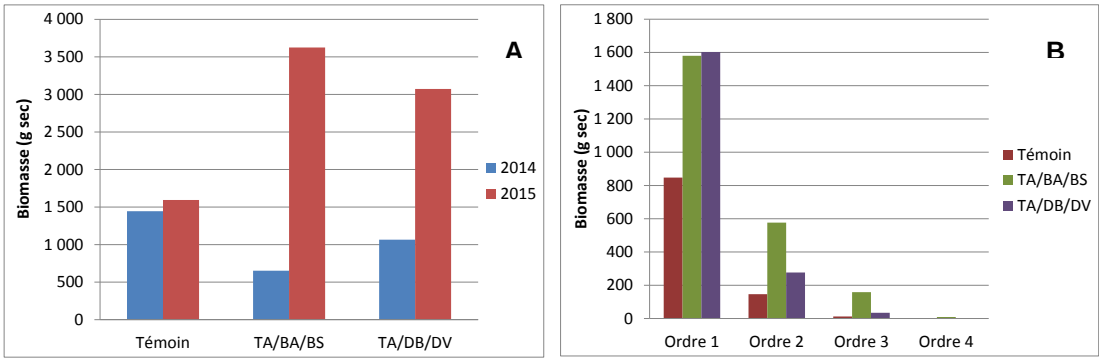


Figure 119. (A) Biomasse aérienne totale des arbres se développant dans les matériaux squelette témoin, TA/BA/BS et TA/DB/DV en 2014 et 2015, (B) Ordre de ramification des arbres en fonction du matériau squelette en 2015

On constate la forte augmentation de la biomasse aérienne entre 2014 et 2015 dans les matériaux squelettes issus des déchets sélectionnés dans ce projet. Le témoin montre une très faible progression, en raison du pH qui a été le principal facteur limitant de croissance. Pour aller plus loin dans l'architecture des arbres, nous avons quantifié la biomasse des branches en fonction de l'ordre de ramification. Un ordre élevé de ramification montre la capacité de l'arbre à acquérir une architecture d'autant plus étoffée. Les arbres se développant sur les déchets issus du projet montrent une meilleure capacité de ramification, et plus particulièrement pour le matériau squelette TA/BA/BS qui est le seul matériau sur lequel l'arbre a pu acquérir un ordre de ramification de 4.

VI.5. Pédogenèse précoce des Technosols construits

VI.5.a. Description des processus d'évolution pédogénétique

Transformation des matières organiques

A partir de l'échantillonnage des mélanges mis en œuvre, puis des échantillons prélevés dans les lysimètres, ainsi que des analyses d'eaux de drainage, une évolution du stock en carbone organique a été calculé (Tableau 69). Il apparaît qu'environ 0,25% du carbone organique contenu dans le sol aurait été évacué par drainage. Pour ce qui est de la quantité de carbone minéralisé, l'échantillonnage, tel qu'il a été conduit n'a pas permis de quantifier cette fraction.

Tableau 69. Evolution du stock en carbone organique calculé et flux mesurés en éléments majeurs pour la modalité "square & parc"

		C_{org}
		$kg.m^{-2}$
stock (analyses / solide)	t_0	231
	t_{2ans}	239
flux (analyses / percolats)		0,58

En parallèle, nous avons aussi mesuré le potentiel de minéralisation des mélanges TA/DV et TA/CO au laboratoire pendant 187 jours. Il apparaît que le taux de minéralisation était élevé. En effet, la minéralisation du C_{org} était de 26.7 g 100 g^{-1} du C_{org} total pour TA/DV et de 8 g 100 g^{-1} du C_{org} total pour TA/CO ce qui était en accord avec les valeurs de C/N de chaque matière organique (Figure 120).

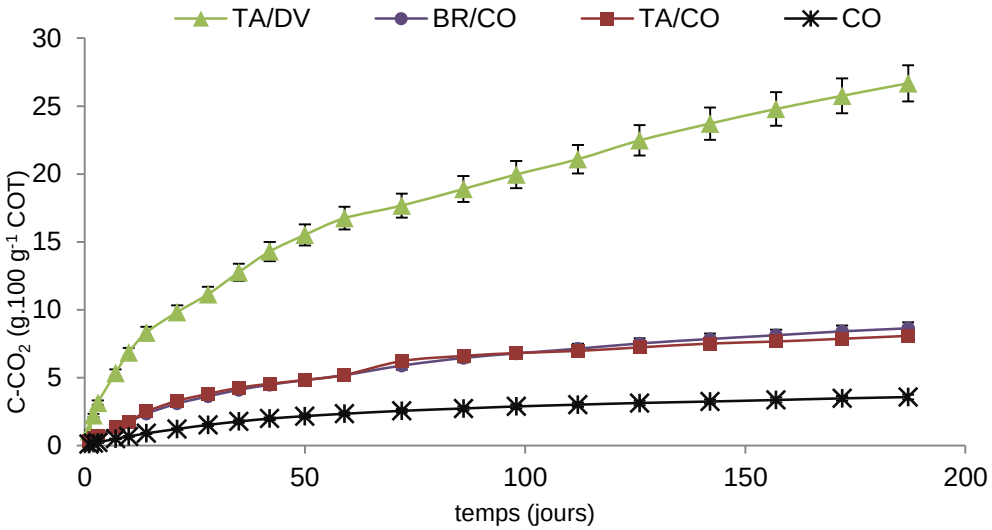


Figure 120 courbe de minéralisation du compost seul et des mélanges TA/CO, BR/CO et TA/DV durant 187 jours, exprimé en carbone minéralisé C-CO_2 par rapport au carbone organique total initial

Agrégation

Les résultats ont montré qu'il est possible de former des macro-agrégats stables (3.15 à 5 mm) en mélangeant deux matériaux technogéniques. La durée de vie d'un agrégat est relativement courte, 38 à 95 jours pour des macro-agrégats > 200 µm (Plant and McGill, 2002) et autour de 88 jours pour des agrégats entre 50 et 200 microns (De Gryze et al., 2006). Donc des essais au laboratoire de courte durée permettent bien d'avoir une première approche de la stabilisation de déchets en mélange. Nous avons évalué deux facteurs pédogénétiques du phénomène d'agrégation : le facteur anthropique lié à la sélection et au mélange des déchets et le facteur biologique lié à l'action des racines.
La nature de la matière organique et de la matière minérale joue un très grand rôle dans la formation des agrégats. Dans ce travail, nous avons trouvé une différence de stabilité structurale des agrégats significative entre CO et DV pour un minéral donné lié à la maturité ou l'immaturité de la matière organique. Dans notre étude, les mélanges avec DV ont un C/N élevé de 29.1 et 35.9 pour TA/DV et BR/DV respectivement. Au contraire les mélanges avec CO ont un C/N faible de 9.6 et 10.5 pour TA/CO et BR/CO respectivement.

Les différences de stabilité observées entre les agrégats de TA/DV et TA/CO au laboratoire sont bien dues au fort potentiel biologique du déchet vert immature. Le rôle des populations microbiennes est aussi décisive dans le processus d'agrégation. L'analyse morpho-analytique des déchets organiques (DV et CO) par microscope électronique à transmission (MET) a montré que CO était constitué de matière organique végétale fortement transformée et les microorganismes étaient principalement des spores de bactéries peu actives ce qui traduit bien la forte maturité du produit. Le déchet vert était lui constitué de bois et de résidus de feuilles et présentait une forte population de bactéries vivantes et actives et aussi de champignons qui avaient colonisés les tissus végétaux et favorisés l'agrégation.
Les mesures de biomasse microbienne à l'état initial révèlent des potentiels microbiens variables en fonction de la nature des matières organiques constitutives des mélanges (Tableau 70). Ces résultats concordent bien avec ceux des minéralisations. Les mélanges impliquant DV présentent une biomasse microbienne 5 à 15 fois plus élevée que celle des mélanges impliquant CO. Le mélange TA/DV (25% de DV en masse) montre une biomasse microbienne de 1,1 $g.kg^{-1}$ MS, tandis que le mélange TA/CO (25% de CO en masse) présente 0,2 $g.kg^{-1}$ de biomasse microbienne.

Tableau 70 : biomasse microbienne et carbone microbien (C_{mic}) comparé au carbone total (C_{tot}) en g.kg^{-1} dans les mélanges à l'état initial à température constante (28°C) (C_0) et après une période d'incubation de 56 jours, à 28°C, à humidité constante

	Initial à C_0			Après 56 jours		
	C_{tot} (g.kg^{-1})	biomasse microbienne (g.kg^{-1} sol sec)	C_{mic} (g.kg$^{-1}C_{tot}$)	C_{tot} (g.kg^{-1})	Biomasse microbienne (g.kg^{-1} sol sec)	C_{mic} (g.kg$^{-1}C_{tot}$)
TA/DV	85,6	1,1	13,1	68,5	2,7	39,1
TA/CO	59,3	0,2	3,4	53	0,2	4,0
BR/DV	155,0	3,3	21,1	158	3,2	20,0
BR/CO	126,0	0,4	3,4	111	0,1	1,4

Après 56 jours d'incubation à 28 °C et à humidité constante, la biomasse microbienne des mélanges a doublé pour le mélange TA/DV, passant de 1,1 à 2,7 g.kg^{-1}. Pour le mélange TA/CO, la biomasse microbienne est restée quasiment constante. Pour les mélanges impliquant BR, la biomasse microbienne a légèrement diminué pour le mélange BR/DV passant de 3,3 à 3,2 g.kg^{-1} et a été divisée par 4 pour le mélange BR/CO, passant de 0,4 à 0,1 g.kg^{-1}. Des relations de corrélations ont été établies entre la biomasse microbienne dans les mélanges et le MWD. Les régressions linéaires tracées en fonction du type de matière organique dans les mélanges avec TA présentent des coefficients de corrélation différents. La relation entre le MWD et la biomasse microbienne du mélange TA/DV est linéaire, avec une R^2 de 0,72. Ainsi, plus la biomasse microbienne augmente, plus la stabilité des agrégats du mélange TA/DV augmente. Pour le mélange TA/CO, la relation linéaire n'est pas aussi évidente, car le MWD évolue très peu au cours de l'alternance de cycles HD. De même, la biomasse microbienne reste à peu près constante et augmente très légèrement au bout de 8 cycles HD, expliquant que le coefficient de corrélation soit si faible (R^2=0,16) (Figure 121).

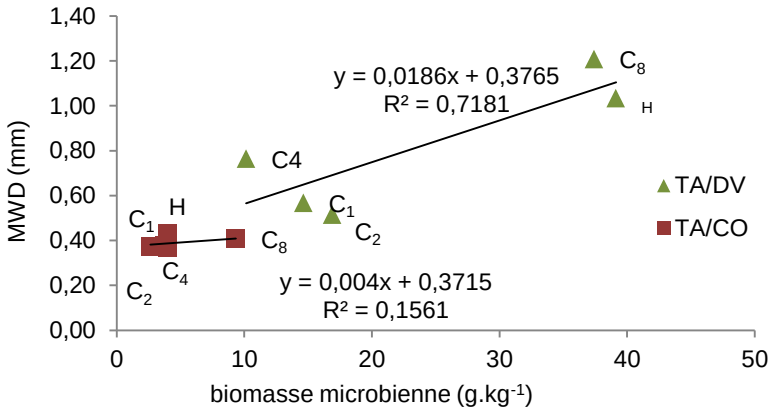


Figure 121 régression linéaire de MWD= f(biomasse microbienne) pour chaque mélange TA/DV et TA/CO avec les données obtenues à l'issue de l'expérience d'alternance de cycles HD

Après 55 jours de culture, les résultats ont montré que (i) la stabilité structurale des agrégats avait augmenté significativement dans les modalités sol nu, ray-grass et colza et (ii) l'influence des racines était significative pour le témoin et le mélange TA/DV uniquement. De nombreux auteurs ont montré l'influence positive des racines sur la stabilité des macro-agrégats des sols agricoles et on peut penser que les racines agissent de de la même façon dans les mélanges de déchets. Dans notre étude le développement de la biomasse au laboratoire était faible quel que soit le traitement ce qui explique les faibles différences de valeurs. Cependant, à court terme, la stabilité structurale des agrégats semble directement relié au développement de la flore fongique décrite avec les observations au MET. Le développement de champignons visibles à l'œil nu a été réalisé sur les mélanges avec DV. Donc l'évaluation de la flore fongique initiale paraît une voie intéressante pour sélectionner les matières organiques les plus efficace en termes de stabilité structurale à court terme.

Concernant la stabilité structurale des agrégats à long terme, nous avons montré dans les lysimètres contenant le mélange BR/CO pour lequel nous n'avions obtenu aucun agrégat au laboratoire après 8 semaines, qu'il s'était formé des agrégats stables après 12 mois voire très stables après 24 mois. Les facteurs temps et climat jouent donc un rôle très important dans le processus d'agrégation avec des matières organiques au départ peu propices à la formation d'agrégats.

Tassement/compaction

Les mesures tout au long des profils de sol effectués sur le site GISFI ont permis de mettre en évidence une baisse de la masse volumique apparente dans les premiers cms (effets des racines) et une légère augmentation sur le reste du profil. Ceci s'est notamment par un tassement de quelques cms des deux sols au cours de l'essai. Sur le site d'AgroCampus Ouest, une augmentation significative et rapide de la masse volumique apparente des mélanges squelette a été observée au cours de la première année suivie d'une augmentation d'intensité beaucoup plus faible entre la première et la seconde année.
Cette comparaison entre les deux sites fait apparaître ainsi l'importance des modalités de mise en œuvre (mode de compaction) sur l'évolution de la masse volumique apparente des Technosols construits. Il est néanmoins possible d'affirmer que l'essentiel du tassement de ces sols a lieu au cours des mois suivants leur mise en œuvre, suivant une courbe exponentielle tendant vers une valeur stable qui semble inférieure à celles mesurées sur les mélanges terre-pierre ou la terre végétale couramment utilisées en végétalisation urbaine.
Néanmoins, les modalités de suivi des sols construits initialement envisagées n'ont pas permis de décrire de manière très précise ces aspects qui mériteraient un suivi dédié.

Altération

Oxydes de fer

Les résultats des extractions séquentielles et des analyses par spectroscopie Mössbauer présentés précédemment apportent un éclairage sur les changements de spéciation du fer associés aux processus d'altération. Ainsi, on a pu montrer que pour le mélange TA/CO, une précipitation d'oxydes de fer pédogénétiques peu cristallisés de type ferrihydrite est intervenue au cours des essais de plantation, soulignant un début de pédogenèse (voir Tableau 1). De la même manière, dans le lysimètre L19, il a été mis en évidence une évolution en fonction de la profondeur, avec une abondance relative d'oxydes de fer plus importante en surface. Les formes les moins libres de Fe, et les moins associées au carbone organique, se retrouvent en profondeur. Par ailleurs, l'abondance relative des oxydes de fer est plus importante au toit de BA/SP plutôt qu'en profondeur : cela pourrait expliquer les colorations particulières des nodules (rouges et vert grisâtres) observées au toit de BA/SP lors du démantèlement du lysimètre. La pédogenèse précoce des Technosols construits se traduit donc par un changement de spéciation du fer, certes encore peu marqué, mais bien visible dans le lysimètre L19. L'étude de cette spéciation est importante car le fer est un élément clef de la dynamique de certains nutriments et de la plupart des polluants minéraux dans les sols où il se trouve principalement sous forme d'hydroxydes. La cristallinité de ces minéraux contrôle en partie leur réactivité chimique et notamment leur capacité à adsorber les ions initialement présents en solution : en général, moins la cristallinité de ces phases sera bonne, et plus le potentiel de sorption d'ions (ex. arséniates) sera important. Ces minéraux jouent aussi un rôle important dans l'agrégation des sols car leur précipitation à la surface d'autres minéraux augmente la réactivité de ces derniers et donc la stabilité des associations entre particules.

Carbonates

Dans le lysimètre L19, les analyses de surface par spectroscopie XPS ont révélé une composition élémentaire très homogène quelle que soit la profondeur de prélèvement des échantillons. Les spectres haute résolution du carbone sont bien évidemment caractéristiques de la présence de matière organique (compost). Cependant, on note de manière intéressante mais avec prudence que la proportion de carbone sous forme de carbonates serait différente en fonction de la profondeur des échantillons analysés. Les carbonates diminueraient en effet significativement pour une profondeur de prélèvement au sein du lysimètre qui augmente.

Lixiviation

Les calculs géochimiques réalisés à partir des résultats des essais de lixiviation en batch et des essais de percolation ascendante en colonne sont détaillés dans le rapport intermédiaire SITERRE à 36 mois. Ces calculs indiquent les phases minérales qui pourraient potentiellement précipiter dans les éluats, lorsque l'équilibre thermodynamique est atteint. Ces résultats pourraient traduire, en condition réelle d'évolution, les interactions entre les eaux météoriques et les matériaux utilisés dans les Technosols construits. Cependant, il faut noter que les ratios L/S (liquide/solide) des essais de lixiviation mis en œuvre sont très supérieurs aux L/S observés en condition de terrain, donc le système est nécessairement plus forcé qu'en conditions réelle, à courte échelle de temps.
Pour les essais en colonnes (réalisés par INSAVALOR selon la norme NF CEN/TS 14405), les résultats concernant les indices de saturation indiquent que plusieurs phases minérales pourraient précipiter d'un point de vue thermodynamique (indices de saturation supérieurs à 0 pour les phases en question). C'est le cas des oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium, de la rouille verte (hydroxyde double de Fe(II) – Fe(III)) et des phosphates pour tous les mélanges. En revanche, aucune précipitation potentielle de phosphates, sulfates ou de silice n'est susceptible d'intervenir.
Pour les essais en batch (réalisés par l'IFSTTAR selon la norme NF EN 12457-2), les espèces suivantes pourraient précipiter : oxy-hydroxydes de fer ou d'aluminium pour tous les matériaux, et carbonates, phosphates (hydroxyapatite) et silice amorphe pour certains matériaux uniquement.
La précipitation d'oxy-hydroxydes de fer confirme les résultats du suivi du statut du fer après altération (cf. § précédent). Cette précipitation, de même que la précipitation potentielle de rouille verte (non confirmée par la caractérisation par contre) est intéressante car elle pourrait permettre d'abattre les teneurs en arsenic relargué, qui sont parfois un peu élevées. En effet, les oxy-hydroxydes de fer et la rouille verte sont de très bons agents adsorbants de l'arsenic (Randall et al., 2001 ; Waychunas et al., 1995). La précipitation potentielle des autres phases ne prête pas à conséquence d'un point de vue relargage ou piégeage de substances problématiques.

Lessivage

Ce processus n'a pas été étudié dans le cadre du projet SITERRE.

VI.5.b. Couplage des processus

Nous avons étudié la faisabilité de construction de Technosols fertiles en mélangeant des déchets et des sous-produits en relation avec leurs propriétés pédogénétiques et plus particulièrement leurs teneurs en matières organiques. Nous avons mesuré au laboratoire la fertilité physico-chimique de 4 mélanges de déchets à un stade précoce de formation des sols. Nous avons conduit une expérimentation en pot et mesuré les interactions entre l'agrégation et les teneurs en P_{Olsen} disponible en déterminant le transfert de ce P disponible dans le système sol-eau-plante.
Les mélanges étudiés étaient les mêmes que ceux présentés au § III.1 concernant les propriétés d'agrégation. Les mélanges ont été placés dans des pots de 2L et laissés nus ou cultivés pendant 55 jours avec du ray-grass ou du colza (voir pages 137 et 138 du rapport intermédiaire à 36 mois de l'étude). Les 2 cultures avaient été choisies pour leur activité et architecture racinaires contrastées.
Les paramètres physiques (MWD indiquant la stabilité structurale) et les paramètres chimiques (pH, C_{tot}, N_{tot}, P_{Olsen}) ont été évalués dans les mélanges et le sol témoin. La concentration en P des tissus végétaux a été mesurée dans les parties aériennes du ray-grass et du colza.

Interaction entre la production de biomasse et de stabilité structurale

Cinquante-cinq jours après le semis, la production de matière sèche aérienne de ray-grass (séchage 48h à 65°C) était la plus élevée pour TA/CO et BR/CO (5.29 et 4.67 g respectivement), moyenne pour le témoin (2.8 g) et la plus faible pour TA/DV et BR/DV (0.12 et 0.11 g respectivement) (n=3 ; $p<0.05$) (Figure 122)

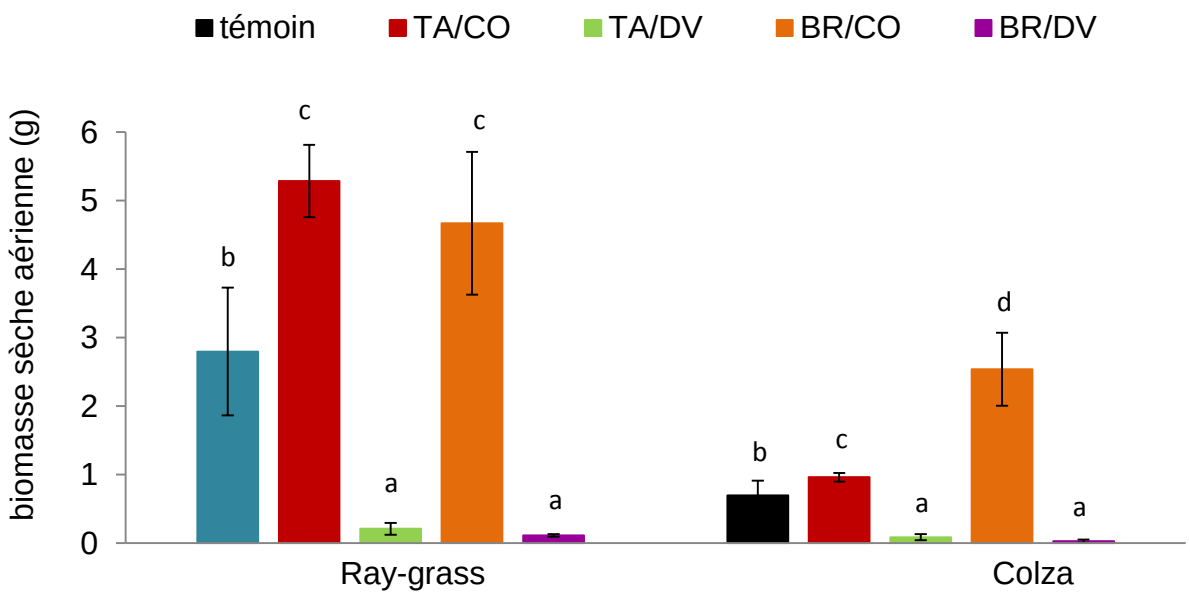


Figure 122 Biomasse sèche aérienne mesurée pour le ray-grass et le colza 55 jours après semis. Les valeurs présentées avec la même lettre ne présentent pas de différence significative. Les barres d'erreurs sont des erreurs standard (n=3)

Les résultats d'agrégation ont été présentés précédemment sur la figure 5 et ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre les pots en sol nu et les pots cultivés.

Transferts du P dans le sol et dans les plantes

A l'état initial la teneur en P total dans les mélanges dépend de la nature de la matière organique pour un même matériau minéral donné (Tableau suivant). Les teneurs en P ne sont cependant pas faibles dans TA et BR (0.6 et 0.7 g kg^{-1} respectivement). Si on compare les mélanges par paires, ceux contenant du compost CO montrent des concentrations initiales plus élevées (7.2 et 15.2 g kg^{-1} pour TA/CO et BR/CO respectivement) que les mélanges à base de déchet vert (1.4 et 2.5 g kg^{-1} pour TA/DV et BR/DV respectivement).

Tableau 71 Propriétés physiques et chimiques des 4 déchets sélectionnés, du sol témoin et des 4 mélanges de déchets

	pH H_2O	C_{org}	C_{tot}	N_{tot}	P_{tot}	P_{Olsen}	$CaCO_3$	CEC ($cmol^+$ kg^{-1})
		(g kg^{-1})						
témoin	7.4	12	12.1	1.0		0.13	0.5	7.8
TA	4.9	1	1	0.3	0.6	0.02	0.5	3.7
BR	9.3	0	1	0.1	0.7	0.03	89.0	1.6
CO	7.8	223	224	23.0	35.3	0.90	11.8	54.6
DV	7.9	299	300	12.9	4.9	1.43	15.1	31.2
TA/CO	7.6	56.5	59.3	6.3	7.2	0.37	3	10.9
TA/DV	8.1	75.5	83.2	3.4	1.4	0.28	4	-
BR/CO	7.4	55.7	119.7	10.5	15.2	0.58	9	24.2
BR/DV	7.7	149.5	183.2	5.1	2.5	0.52	12	-

Donc avant le semis, les concentrations en P_{Olsen} assimilable sont plus élevées dans les mélanges avec CO (0.37 et 0.58 g kg^{-1} pour TA/CO et BR/CO respectivement) que pour les mélanges avec DV (0.28 et 0.52 g kg^{-1} pour TA/DV et BR/DV respectivement) et le témoin (0.13 g kg^{-1}). Pour tous les mélanges et le témoin, les teneurs en P_{Olsen} sont plus élevées que la valeur moyenne des sols naturels en France 0.05 g kg^{-1} (Jolivet et al, 2006). Au cours de l'expérimentation, dans les pots nus, la teneur en P_{Olsen} augmente lentement dans le témoin et dans les mélanges (de 0.13 à 0.17 g kg^{-1} pour le témoin, de 0.37 à 0.38 g kg^{-1} pour TA/CO et 0.58 à 0.66 g kg^{-1} pour BR/CO et de 0.25 à 0.65 g kg^{-1} pour BR/DV) sauf pour TA/DV pour lequel la teneur passe de de 0.28 à 0.21 g kg^{-1}. L'influence de la nature de la matière organique sur le statut du P disponible a donc été étudié pendant 55 jours

et la teneur en P_{Olsen} était significativement plus élévée dans les mélanges avec briques que dans les mélanges avec terre excavée ou le sol témoin.

Les mélanges qui présentaient les plus fortes teneurs en P_{Olsen} n'ont pas permis les prélèvements les plus forts par les plantes (Figure 123). Après 55 jours de croissance, l'accumulation de P dans la partie aérienne du mélange TA/CO est proche de celle du mélange BR/CO (2.89 et 2.96 g kg^{-1} respectivement). Donc le mélange TA/DV qui avait une teneur en P_{Olsen} deux fois plus faible que BR/DV a cependant permis une accumulation de P dans les parties aériennes du ray-grass deux fois plus fortes (2.07 et 1.41 g kg^{-1} respectivement).

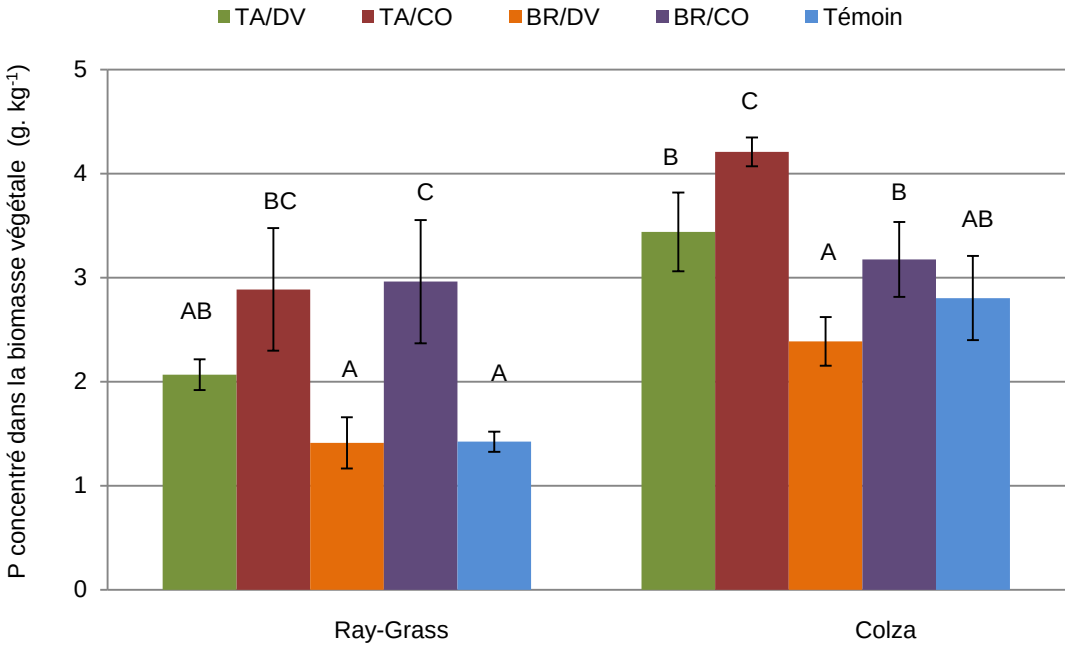


Figure 123 Teneurs en P mesurées dans la biomasse aérienne du ray-grass et du colza 55 jours après le semis. Les valeurs suivies par des lettres différentes pour un même traitement et entre les mixtures sont significativement différentes. Les barres d'erreurs sont des erreurs standard (n=3)

Pour le colza, la plus forte concentration de P dans les parties aériennes est obtenue avec AE/CO (4.21 g kg^{-1}). Dans TA/DV et BR/CO les concentrations en P sont significativement plus faibles (3.44 et 3.17 g kg^{-1} respectivement). Le calcul du rapport entre le P accumulé dans les parties aériennes et la teneur en P total initial dans les mélanges montre que le colza accumule plus que le ray-grass pour tous les mélanges et que de plus ces valeurs sont supérieures au rapport entre le P disponible et le P total initial à t0 pour TA/CO et TA/DV (Tableau 72).

Tableau 72 Rapport entre le P assimilable et le P total et rapport entre le P accumulé dans les parties aériennes et le P total initial contenu dans chaque mélange.

	P_{Olsen}/P_{total} à t0	$P_{accumulé}/P_{total}$	
		Ray-grass	Colza
		(g $100g^{-1}$)	
TA/CO	5.14	4.01	5.85
TA/DV	20.00	14.76	24.56
BR/CO	3.82	1.95	2.09
BR/DV	20.80	5.64	9.55

Interaction entre l'intensité d'agrégation et la libération de P assimilable pour les plantes

Le facteur anthropique de sélection des déchets organiques est le facteur majeur qui influence le processus d'agrégation et l'apport de nutriments. A la suite de cette étude, nous pouvons avancer comme hypothèse majeure que la stabilité des agrégats formés et la libération de nutriments sont conditionnées par le potentiel de dégradation du déchet organique. Nous avons étudié les interactions qui existent entre tous les paramètres mesurés dans le système de Technosol construit : biomasse

aérienne, stabilité structurale (diamètre moyen pondéré ou MWD), pH, teneur en nutrients (P_{Olsen}, N_{tot}, C_{tot}).une analyse en composante principale a montré que les mélanges testés avec peu de caractéristiques en commun (Figure 124).
Le mélange BR/CO est essentiellement caractérisé par sa teneur en P assimilable et sa forte teneur en azote total qui permettent la plus forte production de biomasse. Le mélange TA/CO est proche de l'origine et n'est pas clairement représenté. Le sol témoin est caractérisé par de faibles concentrations en N et P assimilable.

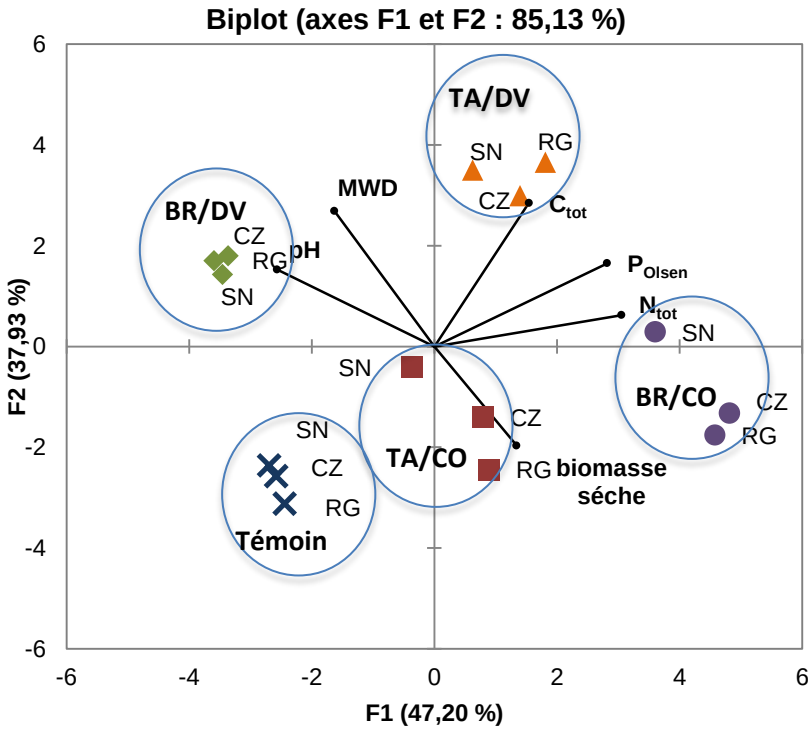


Figure 124 Analyse en composante principale des paramètres physique (MWD), chimiques (pH, P_{Olsen}, N_{tot}, C_{tot}) et biologique (biomasse sèche aérienne) mesurés après 55 jours pour les traitements sol nu (SN), ray-grass (RG) et colza (CZ) pour tous les mélanges et le témoin.

Nous avons étudié la corrélation entre les différents paramètres mesurés (Tableau 73). Le processus d'agrégation et le P_{Olsen} sont indépendants avec une très faible correlation de – 0,03. Ce résultat est en accord avec la littérature qui a montré que le P est prélevé en plus grande quantité dans les sols riches en petits agrégats. Les mélanges avec CO ont les MWD les plus faibles avec tous leurs agrégats inférieurs à 2mm après l'étude au laboratoire et les teneurs en P assimilables les plus élevées.

Tableau 73 Correlation coefficients (r) between physical parameter (MWD), chemical parameters (pH, P_{Olsen}, N_{tot}, C_{tot}) and biological parameters (dry aerial biomass) of the principal component analysis. Values in bold are significant correlations at the 0.05 probability level.

parameter	MWD	P_{Olsen}	pH	C_{tot}	N_{tot}	dry biomass
MWD	**1**					
P_{Olsen}	-0.03	**1**				
pH	**0.78**	-0.44	**1**			
C_{tot}	0.51	**0.84**	0.04	**1**		
N_{tot}	-0.32	**0.86**	**-0.55**	**0.56**	**1**	
dry biomass	**-0.52**	0.04	-0.42	-0.24	0.26	**1**

La valeur de MWD est fortement corrélée avec le pH (0,78) tandis que le P_{Olsen} est fortement corrélé avec C_{tot} et N_{tot} : 0,84 et 0,86 respectivement. Le MWD a une corrélation négative avec la biomasse aérienne (-0,52) et les mélanges avec DV ont la production de biomasse la plus faible. Dans les mélanges avec DV, la dégradation rapide de la matière organique nécessite une disponibilité en azote suffisante pour permettre l'activité intense des microorganismes. Souvent l'azote prélevé dans les réserves du sol par les micro-organismes devient insuffisant pour le développement des plantes et

une compétition se forme pour la consommation de N entre les microorganismes et les plantes pour les mélanges avec DV.

Les interactions entre l'agrégation et la libération du P sont complexes et fortement liées aux caractéristiques du déchet organique. Dans le compost, les réserves en N et P sont élevées et localisées sur une matière organique stable. Les microorganismes sont peu actifs et le P et N vont être libérés à moyen et long terme et rendre le mélange plus durable pour le développement de la plante. Dans le déchet vert, N et P sont localisées dans les parois et les cellules du matériau organique et des résidus microbiens. La forte activité des micro-organismes va libérer rapidement le P phytoassimilable à la fois pour les micro-organismes et les plantes couplés avec une compétition pour l'azote.

VI.5.c. Prospective sur le fonctionnement à long terme des sols construits

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de mettre en évidence une évolution significative des caractéristiques physico-chimiques des Technosols construits, mais également de leur organisation / structure.
Il apparaît ainsi que des agrégats stables se sont formés en conditions réelles dans une proportion nettement supérieure à ce que les essais en laboratoire laissaient préfigurer. Ce point particulier est à remarquer puisqu'il a permis de mettre en évidence une amélioration de la fertilité physique du sol. Celle-ci reste d'ailleurs favorable à la fonction de support de végétation, malgré une augmentation sensible de la masse volumique apparente, pour atteindre des valeurs qui restent tout à fait favorables.
Certaines phases minéralogiques ont également connu une évolution au cours du temps. Certains minéraux contenus dans les matériaux parents, particulièrement sensibles à l'exposition aux conditions environnementales réelles ont ainsi contribué à une lixiviation significative d'éléments (e.g. sulfates, chlorures). Outre l'impact potentiel que ce transfert d'éléments pourrait avoir sur d'autres composantes de l'environnement (*i.e.* nappes souterraines), pour ce qui est de la fonction première recherchée des sols construits (production de biomasse), c'est un élément positif puisque ces anions, qui étaient présents en excès, ont été lixiviés.
Les données obtenues sur l'évolution des stocks en nutriments (*e.g.* azote, phosphore), même si elles demanderaient à être validées sur de plus longues périodes, indiquent que la fertilité chimique des Technosols construits reste également satisfaisante. En effet, au regard des résultats obtenus en colonnes lysimétriques, il semble que les concentrations sont stables, voire même, légèrement croissantes au cours du temps. Ceci s'explique probablement par un tassement global des sols, mais aussi probablement par la mise en place d'un cycle biogéochimique de recyclage des nutriments.

VI.6. Discussion sur les services rendus par les sols construits

Les bénéfices pour l'Homme engendrés par les écosystèmes ou « services écosystémiques » offrent des perspectives de réponses à de nombreuses questions environnementales (Costanza, 1997). Dans un contexte de forte croissance démographique, les besoins en ressources et les contraintes pour améliorer la qualité de vie sont croissants. Les fonctionnalités des écosystèmes et les services écosystémiques associés apparaissent alors indispensables à la viabilité des sociétés humaines. Le projet SITERRE a permis de démontrer que des alternatives à la consommation de ressources naturelles existent pour l'aménagement d'espaces végétalisés en milieu urbain. Les pratiques actuelles de végétalisation de l'espace urbain ont largement recours à la terre végétale et aux granulats extraits de carrière et il est légitime de s'interroger sur les « performances » de ces systèmes alternatifs que sont les sols construits à partir de déchets et sous-produits. Pour conduire cette évaluation, nous avons choisi de présenter l'évaluation semi-quantitative (selon un système comportant 4 notes de 0 à +++) qui traduit le niveau de service rendu par 4 modalités de sol en comparant les 2 techniques traditionnelles de mise en place de sol avec les 2 techniques alternatives réalisées à partir de déchets et sous-produits :

- Une terre végétale pour un usage « square et parc »,
- Un mélange terre-pierre pour un usage « arbre de plantation »,
- Un sol construit pour un usage « square et parc » (horizon BR/CO et horizon BA/SP),
- Un sol construit pour un usage « arbre de plantation » (horizon BR/CO et horizon TA/BE/DV).

Il est à noter que la liste des 24 services écosystémiques évalués est adaptée au cas d'étude du milieu urbain, comme recommandé par TEEB (2011). Enfin, l'évaluation semi-quantitative repose soit

sur les résultats expérimentaux directs du projet SITERRE, soit sur des résultats indirects ou projections.

Pour un grand nombre des services écosystémiques analysés (Tableau 74), il n'y a pas de différence significative entre les pratiques usuelles d'aménagement d'espaces verts et la construction de sol à partir de matériaux de substitution. Outre le fait que la contribution des espaces végétalisés à la fourniture de services écosystémiques est très significative - à l'exception de certains services de support physique, d'approvisionnement en aliment et de certaines activités sportives - nos travaux indiquent que les sols construits peuvent remplir les mêmes fonctions que la terre végétale et le mélange terre-pierre initial. Les sols construits semblent offrir de meilleures performances pour certains services comme la régulation du climat global. En effet, les sols construits à partir de ressources locales nécessitent par définition moins de transport que la terre végétale et surtout que le mélange terre-pierre. De plus le recours à des déchets et sous-produits organiques, notamment utilisés pour les horizons de profondeur, permet de contribuer à stocker du carbone dans les sols et limiter ainsi l'émission de gaz à effet de serre. Dans la même logique, il est évident que la construction de sol permet d'optimiser le recyclage de déchets, à l'opposé des pratiques habituelles. Enfin, nos résultats de mesure de stabilité structurale indiquent la formation d'associations organo-minérales plus stables dans certains sols construits que dans des terres végétales classiques. Cependant, certaines lacunes des sols construits apparaissent, en particulier pour : i) la purification de l'eau (des transferts de certains anions tels que les sulfates et chlorures ont été mis en évidence), ii) la constitution d'un réservoir de biodiversité (cet aspect n'a pas été étudié de manière dédiée dans le projet SITERRE et mériterait confirmation et étude sur un plus long terme), iii) l'évaluation complète du support de voirie (les performances géomécaniques du sol construit ont été vérifiées au laboratoire et l'indice de portance immédiat est très correct mais des mesures sur le terrain doivent confirmer ces résultats).

Tableau 74 : Evaluation semi-quantitative des services écosystémiques rendus par les sols construits, en comparaison des pratiques habituelles basées sur l'utilisation de ressources naturelles

			Usage "square & parc"		Usage "arbre de plantation"	
Classes	**Services**	**Sous-services**	**Terre végétale**	**Sol construit**	**Mélange terre-pierre**	**Sol construit**
Régulation	Régulation de la qualité de l'air	Consommation CO_2	++	++	++	++
		Production O_3	++	++	++	++
		Particules fines (poussières)	+	+	++	++
	Régulation du climat	Climat local	+++	+++	+++	+++
		Climat global	++	+++	+	+++
	Traitement des déchets	Recyclage	0	+++	0	+++
	Purification de l'eau	Transfert de polluants	++	+	++	+
	Régulation des nuisances sonores	Ecran anti-bruit	0	0	+	+
	Régulation des aléas naturels	Inondations	+++	+++	+++	+++
		Erosion	++	++	+	++
Support	Réservoir pour la biodiversité	Habitat pour la faune du sol	+++	++	++	++
	Support physique	Voirie lourde	0	0	+	0
		Voirie légère	0	0	++	+
		Circulation piétons	+	+	++	++
		Réseaux VRD	++	++	++	++
Approvisionnement	Aliments	Céréales et légumes	0	0	0	0
		Fruits	0	0	+	+
	Matériaux	Remblais	+	0	++	0
	Energie	Géothermie de surface	++	++	+	+
	Ressources ornementales	Pelouses	+++	+++	++	+
		Arbres	+	+	++	++
		Fleurs	++	++	+	+
Culturel	Agrément de l'environnement	Activités sportives et de loisirs	+	+	0	0
		Paysage / esthétique	+++	+++	+++	+++
				projection ou mesure indirecte		

VII. Vers l'élaboration de la filière par une approche et méthode multicritères (=Tâche 5)

VII.1. Analyse réglementaire

VII.1.a. Analyse réglementaire de la réglementation actuelle

Les sols reconstitués ont pour objectif principal la création d'un support de culture pour les végétaux à usage non agricole. Il n'existe pas de réglementation spécifique à la reconstitution des sols. Néanmoins, le code rural défini dans l'article L722-2 les travaux agricoles comme :
1° Les travaux qui entrent dans le cycle de la production animale ou végétale, les travaux d'amélioration foncière agricole ainsi que les travaux accessoires nécessaires à l'exécution des travaux précédents ;
2° Les travaux de création, restauration et entretien des parcs et jardins.
De même, le code rural définit les supports de culture comme des produits destinés à servir de milieu de culture à certains végétaux (Article L255-1).
Les sols reconstitués, dont la fonction principale est d'assurer la croissance du couvert végétal et de permettre l'ancrage des racines ainsi que l'alimentation hydrique et minérale, seraient donc considérés comme des supports de cultures. Leur mise sur le marché est *a priori* régie par la réglementation des matières fertilisantes et des supports de culture (article L 255-13 du code Rural) :
« …..Il est interdit d'importer, de détenir en vue de la vente, de mettre en vente, de vendre, d'utiliser ou de distribuer à titre gratuit, sous quelque dénomination que ce soit, des matières fertilisantes et des supports de culture lorsqu'ils n'ont pas fait l'objet d'une homologation ou, à défaut, d'une autorisation provisoire de vente, d'une autorisation de distribution pour expérimentation ou d'une autorisation d'importation.
Toutefois, sous réserve de l'innocuité des matières fertilisantes ou supports de culture à l'égard de l'homme, des animaux, ou de leur environnement, dans des conditions d'emploi prescrites ou normales, les dispositions du premier alinéa ne sont pas applicables :
1° Aux produits dont la normalisation, au sens de la loi du 24 mai 1941, a été rendue obligatoire ;
2° Aux produits mis sur le marché dans les conditions prévues par les dispositions réglementaires prises en application de directives des communautés européennes, lorsque ces dispositions ne prévoient ni homologation ni autorisation préalable à la mise en vente ;
3° Aux rejets, dépôts, déchets ou résidus dont l'évacuation, le déversement ou l'épandage sur des terrains agricoles est réglementé, cas par cas, en application de la loi n° 64-1245 du 16 décembre 1964 relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution ou du livre V (titre Ier) du code de l'environnement ou de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau, eu égard à la conservation de la fertilité des sols ;
4° Aux produits organiques bruts et aux supports de culture d'origine naturelle non mentionnés au 3°, livrés en l'état ou mélangés entre eux, lorsqu'ils sont obtenus à partir de matières naturelles sans traitement chimique, qu'ils constituent des sous-produits d'une exploitation agricole ou d'un établissement non agricole d'élevage ou d'entretien des animaux et sont cédés directement, à titre gratuit ou onéreux, par l'exploitant…. ».

Cadre général de la réglementation des supports de culture

La réglementation citée ci-dessus, définit trois voies d'emploi pour les matières fertilisantes et les supports de culture.

1. La voie « naturelle » concerne principalement l'utilisation des matières fertilisantes de type « déjections animales brutes » sans aucune transformation. Elle ne concerne donc pas les sols reconstitués.

2. La logique « produit » comprend les voies de mise sur le marché :

    - des produits homologués,
    - des produits conformes à une norme rendue d'application obligatoire,
    - des produits conformes à certaines dispositions réglementaires prises en application de directives des communautés européennes.

3. La logique "déchet" concerne le retour aux sols de certains déchets par voie d'épandage. Elle est encadrée par des arrêtés spécifiques pour l'épandage de certains déchets en milieu agricole.

La Figure 84 donne un aperçu simplifié des voies de mise sur le marché des matières fertilisantes et des supports de culture.

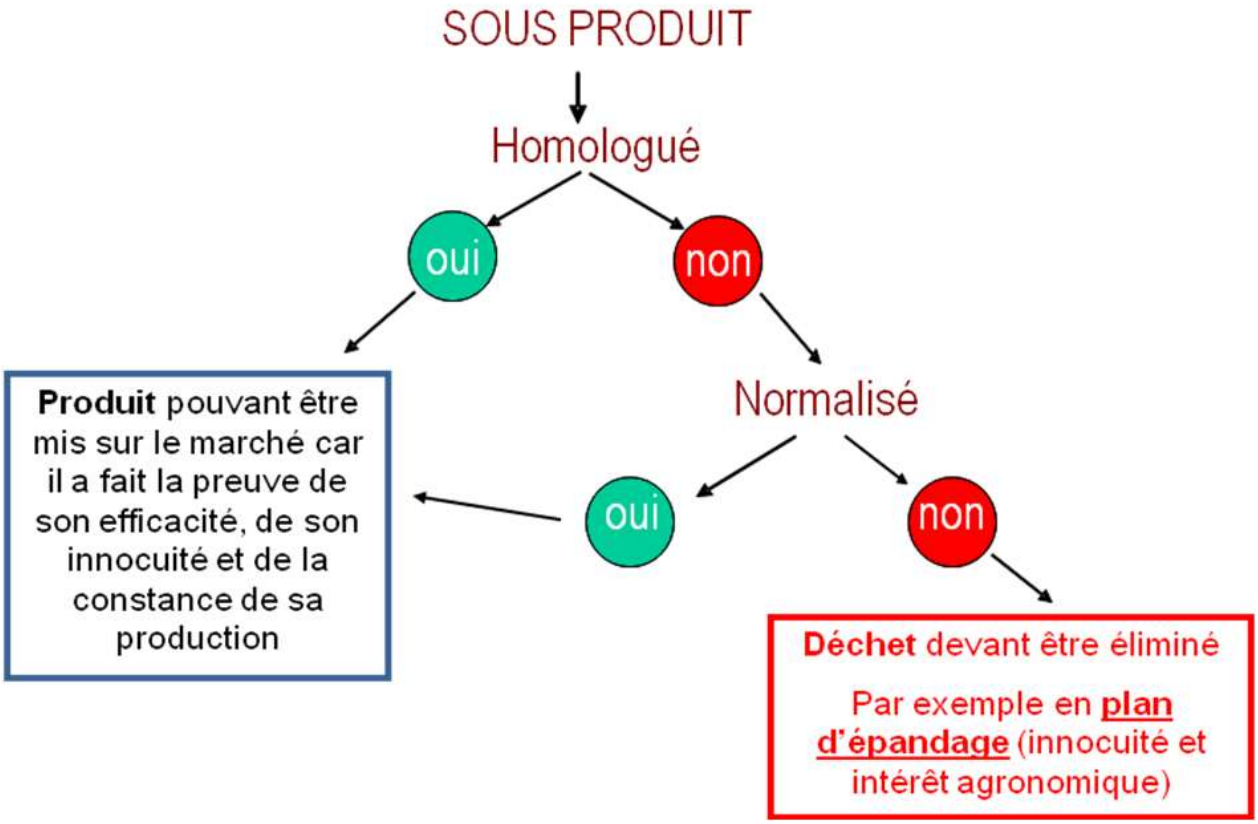


Figure 125 : Schéma synthétique des procédures de mise sur le marché des matières fertilisantes et des supports de culture.

Mise sur le marché des supports de culture par voie d'homologation

L'homologation est le régime obligatoire pour mettre sur le marché des matières fertilisantes et des supports de culture. L'homologation est accordée par le Ministre en charge de l'agriculture, après instruction du dossier et avis de l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). Pour des produits demandant à entrer sur le marché français, cette procédure correspond à une demande d'autorisation d'Importation (API).

L'article L.255-3 du Code rural définit les critères nécessaires pour obtenir une homologation d'une matière fertilisante. Ces mêmes critères sont repris de manière très détaillée dans une note d'information aux pétionnaires concernant l'homologation des MFSC éditée par l'ANSES en juin 2010. Il s'agit des critères de :

- l'efficacité en tant que matière fertilisante ou support de culture ;
- l'innocuité à l'égard de l'homme, des animaux et de l'environnement
- la constance de composition.

A titre d'exemple, pour l'innocuité des supports de culture, le Tableau 59 donne les teneurs maximales en ETM dans les supports de culture.

Tableau 75 : Teneurs maximales en ETM

ETM	mg/kg MS
Cadmium	2
Chrome	150
Cuivre	100
Mercure	1
Plomb	100
Zinc	300
Nickel	50

Le catalogue des matières fertilisantes et des supports de culture, publié par le Ministère en charge de l'agriculture en 2009, possédant une homologation pour la mise sur le marché comprend une dizaine de supports de culture dont TERROSMOCT, CAPAGRO, etc.

Mise sur le marché des supports de culture par voie de normalisation

La norme NF U44-551 est une norme produit (DSM : dénomination, Spécification, Marquage) rendue d'application obligatoire et qui régit la mise sur le marché des supports de culture par la voie de normalisation. Elle comprend plusieurs dénominations ou types de produit avec des caractéristiques spécifiques bien précises (type de matériaux et de mélanges, teneurs en matière organique, teneurs en matière sèche, granulométrie, type d'additif autorisé, ….).
La norme NF U44-551 comprend plus de 27 dénominations classées en trois classes :

1- Supports de culture minéraux et de synthèse minérale ou organique
2- Supports de culture avec matières organiques végétales prépondérantes
3- Supports de culture des classes 1 ou 2 avec additifs.

La mise sur le marché d'un support de culture par voie de normalisation implique que le produit concerné correspond bien à une dénomination et à une spécification de cette norme.
A titre d'exemples, nous donnons ci-dessous les caractéristiques spécifiques de quelques dénominations de la norme NFU 44-551 :

Supports de culture minéraux et de synthèse minérale ou organique	
Dénomination « Terre support »	Terre issue d'horizons de surface humifères ou d'horizons profonds pouvant être mélangée avec des matières minérales, caractérisé par des teneurs en matière organique comprises entre 1 et 5 % de MS et une fraction fine (<2 mm) supérieure à 50 % de la masse totale.
Dénomination « Terre végétale »	Terre issue de surface humifères ou d'horizons profonds pouvant être mélangée avec des matières organiques d'origine végétale, des amendements organiques et/ou des matières minérales ». Elle est caractérisée par un taux de matière organique compris entre 3% et 15% de la masse totale (matière sèche) et une fraction fine (<2 mm) supérieure à 50 % de la masse totale.
Dénomination « Substrat minéral »,	Mélange de matières minérales pouvant intégrer des matières organiques et/ou des matières synthétiques. Il est caractérisé par un taux de matière organique inférieur à 10 % de la masse totale (matière sèche) sans indication spécifique sur la granulométrie.
Supports de culture avec matières organiques végétales prépondérantes	
Dénomination « Support de culture végétal »	Matières végétales (liste non limitative) telles que paille fraiche, fibres de lin, … ne pouvant avoir subi que des traitements physiques. Il est caractérisé par un taux de matière organique supérieur à 70 % de la masse totale.
Dénomination « Substrat organo-minéral »	Mélange de matières organiques et de matières minérales pouvant intégrer des amendements organiques de la terre et des matières synthétiques (uniquement polystyrène broyé non traité chimiquement). Il est caractérisé par un taux de matière organique compris entre 10% et 40% de la masse totale.

D'autres critères physico-chimiques (pH, conductivité, masse volumique…..) doivent aussi être analysés.

Néanmoins, la liste des matières autorisées dans ces dénominations est strictement définie :

- Matières minérales : uniquement roche volcanique, sable, argile expansée ou non, schiste expansé, perlite, vermiculite expansée, laine minérale et les amendements minéraux basiques normalisés.
- Matières synthétiques : produit obtenu artificiellement par synthèse chimique, ici uniquement le polystyrène broyé non traité chimiquement.

Enfin, la norme NF U44-551 interdit l'utilisation des boues de STEP et les produits qui en sont issus dans la fabrication des supports de culture conformes à cette norme. Elle stipule également que toutes les matières premières utilisées doivent être en conformité avec les réglementations qui leur sont appliquées.
Par ailleurs, les teneurs maximales des éléments traces métalliques des supports de culture conformes à la norme NF U44-551 sont identiques à celles définies dans le cadre de l'homologation des supports de culture.

Réglementation des sols reconstitués contenant des déchets

Dans l'hypothèse où l'on considère les sols reconstitués comme des supports de culture, l'utilisation des déchets pour la reconstitution d'un sol serait alors régie par la réglementation de l'utilisation des déchets comme matières fertilisantes et des supports de culture.
Dans le cadre de la mise sur le marché d'un support de culture, les déchets non dangereux peuvent être utilisés comme intrants pour la fabrication du produit fini. Les différents tests d'efficacité et d'innocuité nécessaires à la réalisation des dossiers d'homologation fourniront alors les données nécessaires pour permettre au législateur d'autoriser ou non la mise sur le marché de tels produits.
Mise à part cette voie de mise sur le marché (homologation), l'utilisation de déchets pour la fabrication des supports de cultures reste interdite y compris pour les MIATE (boues de STEP) valorisées en agriculture par voie d'épandage agricole.

La réglementation déchets encadre de manière générale, la prévention, la gestion et la valorisation des déchets. Néanmoins, l'utilisation des déchets comme matières fertilisantes ou supports de culture est régie par le code rural. Actuellement, seuls certains déchets (boues de STEP, boues de papèterie et d'industrie agro-alimentaire) peuvent être utilisés dans le cadre des plans d'épandage en milieu agricole conformément à l'arrêté de 1998. Leur utilisation dans des contextes non agricoles (sylviculture, revégétalisation, reconstitution des sols....) reste interdite en absence d'arrêté spécifique pour ce type d'usage.

VII.1.b. Groupes d'experts

Historique

L'ASTEE (Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement, ex-AGHTM) est une association créée en 1905 et reconnue d'utilité publique. Elle rassemble des chercheurs scientifiques, experts et praticiens issus d'organismes publics et privés intervenant dans les services publics locaux de l'environnement dans le but d'élaborer des doctrines partagées et des recommandations techniques. Elle regroupe plusieurs groupes de travail dont le groupe « Boue » de la commission assainissement. Ce groupe travaille, entre autre, sur l'utilisation des boues issues du traitement des eaux usées domestiques pour des opérations de revégétalisation ou de reconstitution des sols.
En 2009, ce groupe de travail a adressé un courrier au Ministère en charge de l'environnement pour connaitre les évolutions envisageables concernant ces pratiques.
En réponse à ce courrier, le Ministère a rappelé l'interdiction de l'utilisation des boues pour ce type d'usage :
« ….En effet, si le code de l'environnement en son article R211-45 prévoit la possibilité d'utiliser les boues pour la réalisation de chantiers de cette nature, il conditionne toutefois cet usage au respect de règles de prescriptions techniques édictées par arrêté conjoint des ministres chargés de l'environnement, de l'agriculture et de la santé. Cet arrêté n'a, à ce jour, pas été pris, en raison essentiellement du défaut de connaissances scientifiques……
Je vous rappelle ainsi en premier lieu, que l'utilisation de boues urbaines pour des chantiers de cette nature n'est actuellement pas possible selon la réglementation….Cet usage est sanctionnable au regard des actuelles dispositions réglementaires. »

Suite à cet échange, les travaux du groupe Boue de l'ASTEE concernant l'utilisation des boues en reconstitution des sols sont ralentis.

VII.2. Analyse technico-économique

La filière SITERRE est-elle économiquement viable ? Ce chapitre a pour objectif de répondre à cette interrogation et à mettre en exergue les déterminants de la compétitivité de la filière SITERRE face à la filière traditionnelle de création de sols.
L'approche méthodologique mobilisée est pragmatique : c'est à partir de trois cas d'études sur les communes d'Angers, de Nancy et de Paris que sera inférée la viabilité de la filière SITERRE et que sera déterminé ses forces et faiblesses économiques.
Evaluer les coûts de la filière SITERRE et ceux de la filière traditionnelle s'effectue en trois étapes : élaborer des hypothèses sur lesquelles la modélisation s'appuiera ; estimer les coûts à partir du modèle de coût et ceci pour chaque cas d'étude et enfin interpréter les résultats pour essayer de les généraliser. La première partie de ce paragraphe explicite les hypothèses retenues. Ces hypothèses sont divisées en deux types : les hypothèses relatives au modèle de coût et les hypothèses relatives à chacun des cas d'étude. La seconde partie de ce chapitre présente les résultats des estimations de coûts des cas d'étude. Ces estimations sont issues de l'outil d'Analyse Multi-Critère (AMC) élaboré pour le programme SITERRE. Enfin la troisième partie tente de généraliser les résultats des différents cas d'études pour estimer les déterminants des coûts, les forces et les faiblesses de la filière SITERRE face à la filière traditionnelle.

VII.2.a. Les hypothèses retenues pour l'estimation de coûts de la filière SITERRE et de la filière traditionnelle.

Afin de clarifier l'ensemble des hypothèses à élaborer pour modéliser les coûts de la filière, il est proposé de les classer en deux ensembles : les hypothèses liées au modèle de coût et les hypothèses liées à chacun des cas d'étude.

Les hypothèses liées au modèle de coût

La modélisation que nous avons élaboré a pour objectif de simplifier la réalité économique de la filière des sols construits en utilisant un certain formalisme afin de permettre d'effectuer des simulations homogène entre les cas d'études et de comprendre le rôle de chacun des phénomènes économiques en œuvre.
La figure suivante permet de schématiser l'occurrence temporelle et géographique des différents types de coûts. Ces types de coûts sont explicités ci-après.

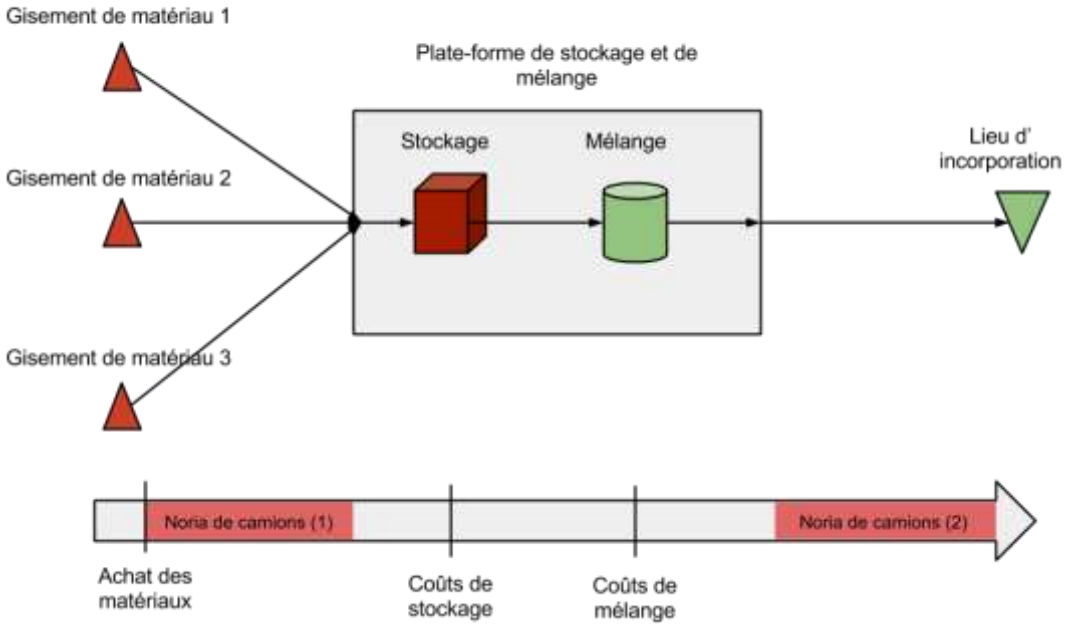


Figure 126 : Modélisation et chronologie des coûts

Cette modélisation s'appuie sur le constat que la construction de sol génère trois types de coûts principaux : les coûts de transports, les coûts d'achats des matériaux et les coûts de mélanges de stockages et d'analyse.

Hypothèse 1 : L'ensemble des coûts de la filière de construction de sols sont des coûts de transports, des coûts d'achats des matériaux et des coûts de mélange, de stockage et d'analyse.

Les coûts d'achats des matériaux

Les coûts d'achats de matériaux sont les coûts issus des montants à mobiliser pour se procurer le matériau hors cout de transport. Ils sont estimés en €/tonne de matériau. Ils comprennent donc soit l'achat du matériau à un prestataire soit les coûts de fonctionnement et d'investissement nécessaire à l'extraction du matériau. Ces coûts peuvent être négatifs lorsqu'un prestataire paie pour se débarrasser d'un matériau qu'il considère comme déchet. Ces coûts financiers peuvent aussi être considérés comme un coût d'opportunité.

Hypothèse 2 : les coûts d'achats des matériaux sont les montants mobilisés pour se procurer le matériau hors coût de transport.

Les coûts de transport

Les coûts de transport sont issus des rotations de camions entre diverses localisations géographiques pour, in fine, permettre de disposer de sol sur le site de construction. Dans ce modèle, nous retenons trois type de localisation géographique : le type gisement de matériaux, le type plateforme de mélange et le type lieu d'incorporation. A partir de ces trois types de localisation, nous ne retenons que deux types de rotations : le trajet du gisement de matériau vers la plateforme de mélange (que nous appellerons petite noria[3]) et le trajet de la plateforme de mélange vers le lieu d'incorporation (que nous appellerons grande noria). Ainsi, il n'existe pas de rotation possible entre le gisement de matériau et le lieu d'incorporation. Toute filière doit donc passer par une plateforme de mélange.

La petite noria a pour objectif de transporter le matériau extrait sur le site de gisement vers la plateforme de stockage et de mélange. La grande noria a pour objectif de transporter le mélange de matériau de la plateforme de mélange vers le lieu d'incorporation.

Hypothèse 2 : Les couts de transport prennent forme au travers de deux norias de camion : la petite noria et la grande noria.

Hypothèse 3: Les camions partent chargés et reviennent vide au point de départ en faisant un aller-retour strict.

Les deux norias ont une structure de coûts similaires : les coûts issus de l'achat de carburant (décompté en €/litre) nécessaire pour effectuer les allers-retours et les coûts issus de la location de camion (décompté en €/demi-journées).

Hypothèse 4 : Les coûts de transport se décomposent en coût de carburant et coût de location de camion

Les coûts de stockage et de mélange

Les coûts de stockage et de mélange sont les coûts engagés par la plateforme de stockage et de mélange pour créer le mélange de matériaux et le stocker. Ces coûts comprennent aussi les analyses nécessaires avant de pouvoir incorporer le mélange dans un sol.

Hypothèse 5 : Les coûts de mélange, de stockage et d'analyse sont exprimés en fonction de la quantité de mélange à créer (en €/tonne).

Hypothèse 6 : Il est considéré que l'incorporation d'un mélange SITERRE sur site n'occasionne pas de coût supplémentaire relativement à un mélange traditionnel.

Les hypothèses liées au cas d'étude

Les hypothèses du modèle s'appliquent à tous les cas d'études alors que les hypothèses de cas d'étude sont spécifiques à chaque cas d'étude (et donc à la ville concernée).

[3] Le terme de noria désigne des allers-retours ininterrompus de véhicules de transport. Les termes de petites et grandes norias sont inspirés du système logistique de transport de victimes mis en œuvre lors de catastrophes naturelles ou technologiques en France (plans rouges). Ce système présente une structure similaire à celui de la modélisation de la filière de construction de sol que nous proposons.

Ces hypothèses touchent les aspects suivants : la localisation des gisements, de la plateforme de mélange et du lieu d'incorporation ; les prix des matériaux ; le tonnage du camion (25, 18 et 13 tonnes); la consommation de carburant de chaque type de camion au 100km ; le prix de la location de camion à la journée, le prix du carburant ; le prix de la tonne de CO2 ; le coefficient de transformation du litre de gasoil à l'émission de CO2. Afin de faciliter la comparaison des cas d'étude, seuls les hypothèses de localisation et de prix des matériaux diffèrent entre les cas d'études analysés dans ce chapitre.

La localisation des matériaux

La localisation des gisements de matériaux est soit connue (cas d'Angers) soit inconnues (certains matériaux de Paris et de Nancy) et des hypothèses sont alors appliquées.
Les hypothèses retenues, lorsque les localisations exactes ne sont pas connues, sont une localisation à l'intérieur de la ville pour les matériaux SITERRE et une localisation en périphérie pour les matériaux traditionnels. Ces hypothèses sont raisonnables car les matériaux SITERRE sont issus du développement de la ville (ex : chantier de construction pour la terre excavée ou le béton concassé). A l'inverse les matériaux traditionnels sont issus d'activités économiques situées en périphérie (ex : carrière pour les pierres, champs agricoles pour la terre végétale). Dans certains cas (Paris et Angers), les matériaux SITERRE sont même déjà présent à la plateforme de mélange et de stockage (car ils étaient destinés à être enfouis) entrainant alors un coût nul de transport pour la petite noria.

La localisation des plateformes de mélange

Ces localisations sont connues pour les villes d'Angers et de Paris. Pour la ville de Nancy, une adresse en périphérie a été choisie.

La localisation des lieux d'incorporations

Les lieux d'incorporation sont tous hypothétiques et situés en centre-ville.

Les prix des matériaux

Les prix des matériaux ont été fournis par le partenaire Durant TP du programme SITERRE pour la commune d'Angers et la commune de Paris. Pour la commune de Nancy, les prix retenus sont ceux de la commune d'Angers.
Certains matériaux ont des prix négatifs. Sans la filière SITERRE, ces matériaux sont déposés sur la plateforme de mélange et de stockage par des entreprises de travaux publics pour leur enfouissement. Le prix négatif est égal au prix payés par ces entreprises à la plateforme de mélange et de stockage pour chaque tonne enfouie.

Autres hypothèses

Les autres hypothèses concernent les proportions des mélanges de matériaux. Pour la filière traditionnelle, les proportions de mélanges sont celles habituellement mise en œuvre dans le secteur (proposées par Durant TP et Plante et Cité). Pour la filière SITERRE, les proportions de mélange sont celles des mélanges mis en lysimètre lors du programme SITERRE ou celles permettant une bonne substituabilité entre les deux filières. Ainsi, pour un même horizon d'usage, les proportions retenues pour les deux filières créent des mélanges réputés substituables entre eux. Les proportions retenues sont détaillées dans la section suivante.
Le détail des hypothèses de cas d'étude sont disponible en Annexe. Le détail des hypothèses du modèle est disponible dans le rapport final du programme SITERRE.

VII.2.b. Les estimations des cas d'études

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer la viabilité de la filière SITERRE. Il est proposé d'évaluer cette viabilité relativement à la filière traditionnelle. Il sera conclu que la filière SITERRE est viable si son coût total est inférieur ou égal au coût total de la filière traditionnelle.
Les estimations sont effectuées,

- pour deux type d'horizons d'usage : l'horizon « squelette » et l'horizon « croissance » ;
- pour trois villes : Angers, Nancy et Paris ;
- pour deux filières : la filière traditionnelle et la filière SITERRE.

Le tableau suivant présente les proportions massiques des mélanges retenus pour chaque simulation.

Tableau 76 : Détail des proportions de mélanges retenus pour les estimations

	Angers		Nancy		Paris	
	Croissance	**Squelette**	**Croissance**	**Squelette**	**Croissance**	**Squelette**
Filière traditionnelle	Terre végétale : 100%	Terre végétale : 32%, Calcédoine : 68%	Terre végétale : 100%	Terre végétale : 45%, Pouzzolane : 55%	Terre végétale : 100%	Terre végétale : 45%, Pouzzolane : 55%
Filière SITERRE	Terre excavée : 83%, Compost : 17%	Terre excavée : 34%, Béton concassé : 63%, Déchets verts broyés : 3%	Terre excavée : 83%, Compost : 17%	Terre excavée : 34%, Béton concassé : 63% Déchets verts broyés : 3%	Terre excavée : 83%, Compost : 17%	Terre excavée : 34%, Béton concassé : 63%, Déchets verts broyés : 3%

VII.2.c. Les résultats

Les hypothèses et paramètres décris ci-dessus sont implémentés par l'outil d'Analyse Multicritère (AMC) élaboré pour le programme SITERRE.
Les résultats suivants sont une agrégation des résultats issus de l'outil. L'outil a été paramétré pour estimer le cout total de 5000 tonnes de sol. Ensuite chacun des postes de coût a été ramené au prix à la tonne (donc en divisant par 5000). Le poste de coût de transport à la tonne est le cout agrégé du transport de la grande noria et de la petite noria de chaque matériau intervenant dans le mélange (pondéré par la proportion massique de chacun des matériaux). Le coût moyen d'achat est la moyenne pondéré par les proportions massiques des prix des matériaux. Les prix des mélanges et d'analyses sont égaux à 6.5€ par tonne.
Les résultats des estimations des coûts de création de mélange pour usage d'horizon croissance sont présentés puis ceux de l'horizon squelette.

Résultats des estimations des coûts pour l'horizon croissance

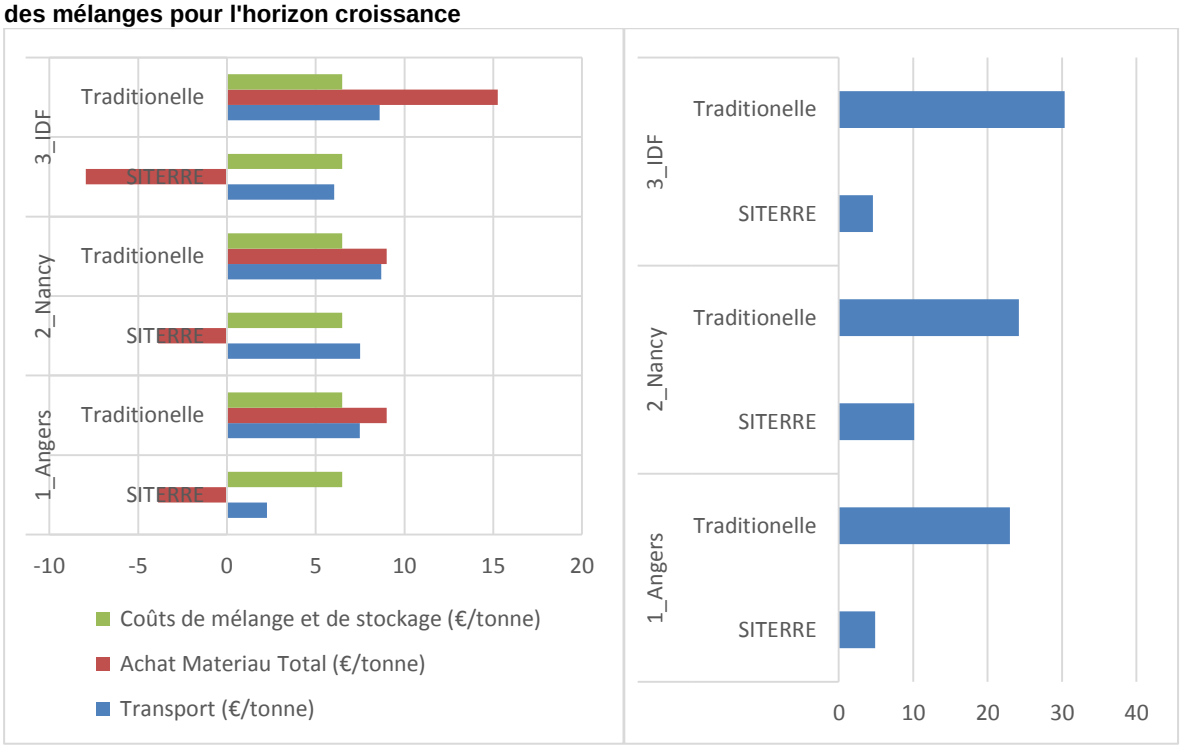
Les résultats des estimations sont détaillés dans le tableau suivant et les 2 figures suivantes.
Les résultats de ces estimations montrent un coût de la filière SITERRE pour la création d'un mélange destiné à un horizon croissance systématiquement inférieur au coût de la filière traditionnelle sous les hypothèses du modèle retenu.
La structure des coûts permet de nous informer de la provenance de ces moindres coûts. Le premier déterminant de compétitivité de la filière SITERRE face à la filière traditionnelle (pour l'horizon croissance) est le prix des matériaux. Ainsi, avec les proportions de matériaux retenus, le prix moyen d'achat à la tonne des matériaux est négatif pour la filière SITERRE (-3,87 € pour Nancy et Angers, -7,95 € pour l'IDF). Ce coût négatif provient du prix négatif de la terre excavée (-6,50 € à Angers et Nancy, -12€ en IDF, Ceci en raison de son statut actuel de déchet) qui est présente en grande quantité dans le mélange SITERRE (83% de terre excavée et 17% de compost). La plus grande proximité des matériaux SITERRE avec la plateforme de mélange limite les coûts mais dans une moindre mesure.
Ce résultat est particulièrement présent pour l'IDF où le coût total à la tonne de mélange s'élève à 30,35€ pour la filière traditionnelle contre 4,59€ pour la filière SITERRE. Pour la filière traditionnelle, le prix d'achat de l'unique matériau nécessaire pour un horizon croissance est élevé (15,25 €/tonne de terre végétale) alors que le prix moyen des matériaux de la filière SITERRE est négatif (-7.95€/tonne) soit un différentiel de coût d'achat moyen de 23,20€/tonne de matériaux. Le différentiel de coût de transport à la tonne de transporté n'est que de 2,55€ en moyenne en faveur de la filière SITERRE.
Pour les villes d'Angers et de Nancy, la filière SITERRE, pour la création de sol horizon croissance, est attractive mais dans une moindre mesure (différentiel entre les deux filières de 18,10€/tonne à Angers et 14,05€ à Nancy). Le différentiel de coût d'achat moyen des matériaux entre les deux filières s'élève à 12,85€ / tonne pour les deux villes en faveur de la filière SITERRE. A Angers, les matériaux de la filière SITERRE sont déjà présents sur la plateforme limitant les coûts de transports de la petite noria. Ceci explique que la filière SITERRE est relativement plus intéressante à qu'à Nancy.

La filière SITERRE pour les sols d'horizon croissance est relativement moins onéreuse que la filière traditionnelle. Pour cet horizon et sous les hypothèses retenues, la filière SITERRE est alors viable pour les 3 villes : Paris, Angers et Nancy.

Tableau 77 : Résultats des estimations des coûts (en €/tonne) pour l'horizon croissance

	Transport (€/tonne)	Achat Matériau Total (€/tonne)	Coûts de mélange et de stockage (€/tonne)
1_Angers			
SITERRE	2,26 €	-3,875	6,5
Traditionnelle	7,48 €	9	6,5
2_Nancy			
SITERRE	7,51 €	-3,875	6,5
Traditionnelle	8,69 €	9	6,5
3_IDF			
SITERRE	6,05 €	-7,95	6,5
Traditionnelle	8,60 €	15,25	6,5

Figure 127 : Structure des coûts (en €/tonne) de l'horizon croissance par filière et coût total (en €/tonne) des mélanges pour l'horizon croissance



Résultats des estimations des coûts pour l'horizon squelette

Les résultats des estimations sont détaillés dans le tableau suivant et les deux figures suivantes.
Les résultats de ces estimations montrent un coût de la filière SITERRE pour la création d'un mélange destiné à un horizon squelette systématiquement inférieur au coût de la filière traditionnelle sous les hypothèses du modèle retenu.
La structure des coûts permet de nous informer de la provenance de ces moindres coûts. Pour l'horizon squelette, ce sont les différentiels de coûts de transports entre la filière traditionnelle et la filière SITERRE qui rendent cette dernière financièrement attractive. Ceci est vrai surtout pour les villes de Nancy et de Paris. Les coûts de transports sont moins polarisants pour la ville d'Angers.
Les villes de Nancy et de Paris créent leur horizon squelette avec de la terre végétale et de la pierre de Pouzzolane. Cette dernière est uniquement située et extraite dans le Massif Central. La petite noria

de camion de notre modèle concentre alors de forts coûts. La filière SITERRE en réutilisant du béton concassé situé dans un périmètre proche de la plateforme de mélange permet d'éviter ces coûts. La ville d'Angers utilise de la Calcédoine extraite en périphérie de son agglomération.
Pour la ville de Paris cela se traduit par un différentiel de coût moyen de transport à la tonne entre les deux filières de 44€ (49.75€/tonne pour la filière traditionnelle et 5,17€/tonne pour la filière SITERRE). Le différentiel est moindre pour la ville de Nancy mais toutefois conséquent à 31,01 € /tonne (36.84€/tonne pour la filière traditionnelle et 5,83€/tonne pour la filière SITERRE. Pour la ville d'Angers, le différentiel de coût de transport entre les deux filières est bien moindre (4,06€/tonne) en raison de l'utilisation de Calcédoine proche de la plateforme de mélange (même si certains des matériaux SITERRE sont déjà présents à la plateforme pour cette ville).
Dans une moindre mesure, le différentiel des coûts d'achats des matériaux augmente aussi la viabilité de la filière SITERRE. En effet, pour les villes de Nancy et d'Angers, le différentiel des coûts moyen d'achat est d'environ 11€/tonne en faveur de la filière SITERRE. L'utilisation de la terre excavée avec un prix négatif a -6.50€/tonne tire le prix moyen d'achat vers le bas. Pour la ville de Paris ce différentiel est moins fort et s'élève à 9€/tonne en faveur de la filière SITERRE.

La filière SITERRE pour les sols d'horizon squelette est relativement moins cher que la filière traditionnelle. Pour cet horizon et sous les hypothèses retenues, la filière SITERRE est alors viable pour les 3 villes : Paris, Angers et Nancy.

Tableau 78 : Résultats des estimations des coûts (en €/tonne) pour l'horizon squelette

	Transport (€/tonne)	Achat Matériau Total (€/tonne)	Coûts de mélange et de stockage (€/tonne)
1_Angers			
SITERRE	1,98 €	2,56 €	6,5 €
Traditionnelle	6,04 €	13,72 €	6,5 €
2_Nancy			
SITERRE	5,83 €	2,56 €	6,5 €
Traditionnelle	36,84 €	13,16 €	6,5 €
3_IDF			
SITERRE	5,17 €	5,01 €	6,5 €
Traditionnelle	49,75 €	13,79 €	6,5 €

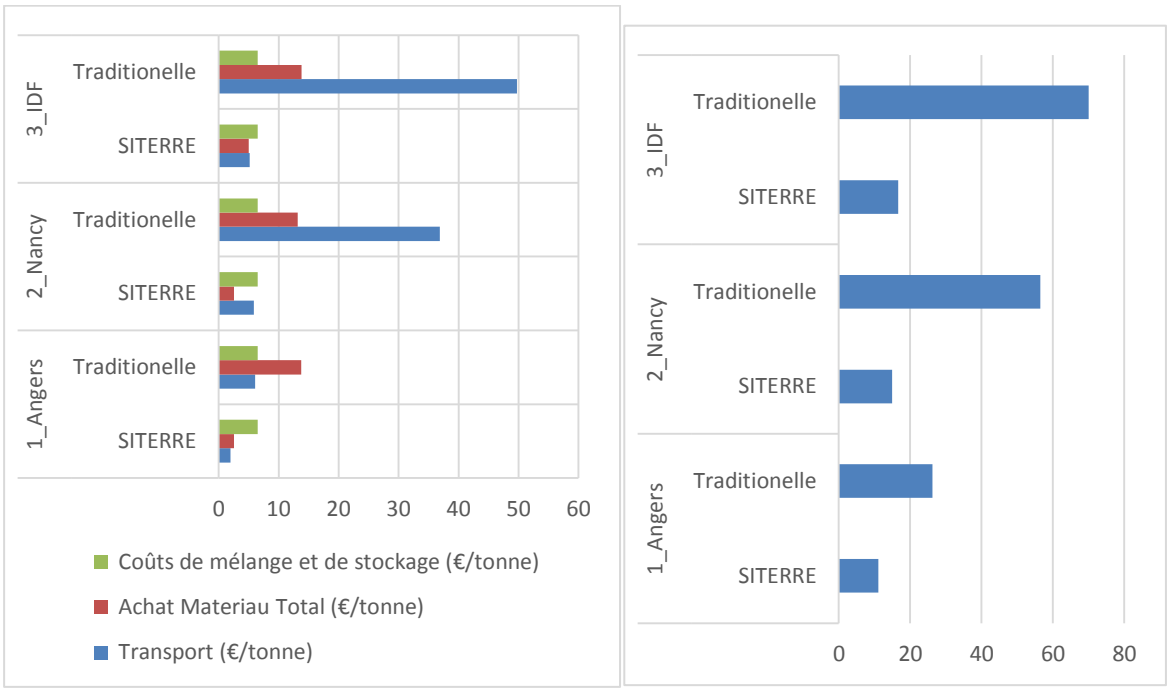


Figure 128 : Structure des coûts (en €/tonne) de l'horizon squelette par filière et coût total (en €/tonne) des mélanges pour l'horizon squelette

VII.2.d. Discussion des résultats et généralisation à partir des cas d'étude

Les simulations effectuées pour les deux horizons et les trois villes montrent que la filière SITERRE est systématiquement financièrement plus intéressante. Ce résultat provient principalement de la proximité des matériaux SITERRE en substitution des mélanges traditionnels pour les horizons squelette et du prix avantageux des matériaux SITERRE en substitution des mélanges traditionnels pour les horizons croissance.
La généralisation de ces résultats nécessite en amont une discussion sur leur validité interne et externe.
La validité interne porte sur la solidité des hypothèses utilisées (le modèle et les paramètres) alors que la validité externe porte sur la portance de ces résultats à d'autres configurations.
Modèles et paramètres ont été élaborés avec un partenaire industriel (Durand TP) situé à Angers. Concernant les hypothèses du modèle, malgré la simplification nécessaire, la grande majorité des potentiels différentiels de coûts entre les deux filières semble être inclue. Trois possibilités d'affinement sont toutefois possible : le prix des analyses des matériaux, le prix des transports et les coûts de mélange.
Les prix d'analyses des matériaux SITERRE sont probablement plus élevés que ceux des matériaux traditionnels. Ceci en raison de la nécessité d'effectuer des analyses sur un spectre de caractéristiques plus large pour les matériaux SITERRE. Les coûts de ces analyses n'étant pas connue, ils n'ont pas été intégrés dans les estimations détaillés dans ce chapitre. Elles viendraient diminuer l'avantage de la filière SITERRE.
Les prix de transport, élevés dans ces estimations (600€ par jour pour un camion et 1,30€ le litre de gasoil) désavantagent les filières allant chercher loin leurs matériaux (cas de la Pouzzolane) et donc avantagent la filière SITERRE dont les matériaux sont situés proche des centres villes.
Les coûts de mélanges sont considéré homogènes pour les deux filières à 6,50€ par tonne mélanges. D'une part, mélanger des matériaux traditionnels et des matériaux SITERRE pourraient nécessiter des capitaux techniques différents, d'autres part, un coût de 6,50 € par tonne mélangée a été retenu y compris pour la filière traditionnelle/horizon croissance constitué d'un seul matériau (la terre végétale) la désavantageant relativement à la filière SITERRE.
Enfin, ces estimations prennent le parti de ne pas retenir les coûts et/ou bénéfices environnementaux et donc de se limiter à une évaluation financière et non économique. En effet, l'outil AMC estime seulement les émissions de CO2 (très corrélés avec les transports). Ceci avantagerait la filière SITERRE car elle permet de parcourir moins de kilomètres pour l'acheminement des matériaux et donc d'émettre moins de CO2 par tonne de mélange. Mais les coûts environnementaux liés à l'incorporation dans les sols des matériaux SITERRE ne sont pas connus et donc ne peuvent être monétarisés.
Concernant la validité externe, les résultats des estimations sont très sensibles à la localisation des matériaux. La validité externe repose donc sur la probabilité que les gisements de matériaux traditionnels soient plus éloignés que les gisements de matériaux SITERRE de la plateforme de mélange. Il est supposé que plus la taille de la ville est grande et plus cette probabilité est forte. Par exemple, plus la taille de la ville est grande et plus la distance à parcourir entre le gisement de terre végétale situé en périphérie et la plateforme de mélange (ou le lieu d'incorporation) à une probabilité d'être élevé. Cette conjecture est partiellement vérifiée par les résultats de ces cas d'étude. La question des prix d'achat des matériaux est plus complexe. Ils dépendent de nombreux paramètres et notamment du contexte local de plusieurs marchés. Enfin, les prix dépendent aussi fortement des choix techniques effectués par les maitrises d'ouvrages. Par exemple, la pierre de Pouzzolane choisie par la ville de Nancy pourrait être substitué par des pierres moins onéreuses en terme de coût de transport (donc au détriment du prix relatif de la filière SITERRE) mais au prix de changement des caractéristiques techniques du mélange terre-pierre.
Il semble ainsi difficile de généraliser l'opportunité d'établir une filière SITERRE selon des éléments aisément identifiables en raison de la multiplicité des paramètres. Mais le programme SITERRE a développé un outil permettant de facilement systématiser ces analyses et les rendre comparables entre elles. Le programme SITERRE n'a donc pas pu fournir une généralisation des résultats économiques mais une méthodologie d'analyse prenant en compte la diversité des situations pour identifier l'opportunité d'établir l'une de ces filières et aider à la décision.

VII.3. Analyse sociétale : l'acceptabilité par les différents publics et utilisateurs

VII.3.a. Eléments de définition

L'analyse sociétale est un terme largement utilisé mais il semble que les sciences sociales éprouvent des difficultés à définir la notion de manière explicite et consensuelle. L'acceptabilité sociale parait être un concept « en creux », c'est-à-dire défini par ses contours et ses déterminants plutôt que par un contenu théorique validé. En ce sens, aucun dictionnaire de sociologie n'aborde l'acceptabilité comme une démarche. En revanche, « perception » et « représentation » sont des termes clairement ciblés. L'acceptabilité sociale et les démarches qui permettent de l'évaluer peuvent résulter de l'analyse croisée de ces deux approches. L'acceptabilité permet également d'évaluer le degré d'approbation d'un projet, en échos à des degrés d'opposition.

Denise Jodelet (1989) définit une représentation sociale comme « une forme de connaissance, socialement élaborée et partagée, ayant une visée pratique et concourant à la construction d'une réalité commune à un ensemble social ». Durkheim (1912) développe quant à lui la notion de représentation collective pour séparer le sociale et la construction qui en résulte, de l'individuel.

L'analyse de la perception permet d'aborder quant à elle, une interprétation de données visuelles. Dortier (2004) précise cette notion : « Dans l'acte de perception, la connaissance se mêle à la pure sensation. Elle ne se résume donc pas à une simple réception de données venues du réel. Les informations en provenance du monde extérieur sont sélectionnées, décodées et interprétées. La perception est une lecture de la réalité qui passe par trois étapes: sensorielle (qui permet de repérer les caractéristiques du milieu extérieur), perspective (repérage des formes perceptives, organisation des données de l'environnement en repérant les distinctions fond/forme, les contours, en déformant ou complétant au besoin les éléments manquants pour redonner aux choses une certaine cohérence) et cognitive (interprétation des données, attribution d'une signification à l'information). La perception en ce sens est une lecture de la réalité, elle est finalisée et orientée en fonction des capacités de nos organes sensoriels mais aussi de nos centres d'intérêt et de connaissances antérieures.

Dans le cadre du projet SITERRE, l'acceptabilité sociale a d'abord été abordée à travers la notion de perception des matériaux (que représente pour vous ces matières ?, sans nom ni explications) et a permis d'analyser leurs évolutions sur la base d'information distillées au cours du temps d'un atelier (nom des matériaux seules, puis associés au visuel, etc.). Cette méthode permet ainsi de saisir les différentes représentations et leurs évolutions lors du passage de l'évaluation individuelle (participants seuls) à collective (réflexion et co-construction au sein du groupe). L'activité développée dans le cadre du projet se saisit donc de ces différentes démarches d'analyse et est simplifiée sous le terme d'évaluation de l'acceptabilité sociale des matériaux et des mélanges.

D'un point de vue opérationnel, cette activité a eu pour double objectif de :

- Fournir un état des lieux de l'acceptabilité d'une filière « sol construit » alternative ou complémentaire de la filière classique «terre végétale», du point de vue des utilisateurs, mais également du grand public.
- Alimenter l'outil multicritères d'aide à la décision à destination des utilisateurs potentiels de sol construits, tant du point de vue de sa structure en vue de répondre à des besoins opérationnels, que du point de vue de son contenu en développant un indicateur permettant de mesurer l'impact sociétal des technosols proposés.

VII.3.b. Revue bibliographique : double zoom acceptabilité et perceptions des boues de STEP en épandage et pour les déchets verts

Une revue bibliographique a été entreprise pour trois matériaux modèles du programme Siterre : boues de stations d'épurations, déchets verts et terres excavées.
La revue bibliographique pour les boues de STEP est développée ci-après dans une première sous-partie.
Pour les déchets verts, la revue n'a pas permis de rassembler un pool bibliographique riche. Son développement est cependant présenté ci-après dans une deuxième sous-partie.
La recherche de références bibliographiques sur l'acceptabilité des terres excavées s'est révélée infructueuse. Un rapprochement a été initié avec le programme de recherche VALTEX sans qu'une passerelle de valorisation sur le volet acceptabilité n'ait pu être réalisé.

Epandage des boues de STEP

L'épandage des boues de STEP pose régulièrement des enjeux d'acceptabilité locale et, de façon plus globale, peuvent être perçues comme faisant l'objet de controverses techniques, c'est pourquoi il semble intéressant de tenter de résumer les différents aspects que revêtent les perceptions de ce matériau et leur évolution.
On peut distinguer deux façons d'aborder la notion d'acceptabilité :

- Les représentations sociales liées à l'objet (définies par Jodelet (1989) comme « une forme de connaissance, socialement élaborée et partagée, ayant une visée pratique et concourant à la construction d'une réalité commune à un ensemble social »), qui doivent être suffisamment positives pour que cet objet soit perçu comme « acceptable » ; la construction d'une représentation sociale passant par l'étape cognitive de la perception.

- Les connaissances des différents acteurs sur l'objet et la confiance dans l'objet et les institutions qui le gèrent.

Chacun de ces éléments se retrouve dans les logiques d'action des différents acteurs concernés par l'épandage des boues.
Par ailleurs, la revue de littérature permet d'identifier deux principales échelles de perception des boues et d'action par les acteurs :

- L'échelle locale (risques et désagréments perçus localement, phénomène NIMBY - « Not in my backyard »)

- L'échelle globale (risques perçus globalement, oppositions de principes).

L'évolution des perceptions des boues

L'évolution des statuts des boues et des pratiques d'épandage

Les matières organiques ont été utilisées comme fertilisants agricoles depuis la sédentarisation et les premières formes d'agriculture. Dès le Moyen-âge, l'agrandissement des villes et concentration de leurs habitants rendent visibles la problématique de l'accumulation des ordures. Celles-ci acquièrent alors les statuts différenciés de « résidus » dans les campagnes et de « déchets » dans les villes (Joncoux 2013). Les échanges s'organisent alors de façon directe ou indirecte entre les producteurs de déchets (les villes) et les réutilisateurs (les industries et l'agriculture). C'est cependant à la fin du 19ème siècle, dans le contexte du courant hygiéniste et alors que les détritus et excréments sont désormais perçus comme source de maladies, que les pouvoirs publics se saisissent de façon systématique de leur élimination (Barles 2005). A la même époque, les réseaux d'égouts se développement et les eaux usées sont le plus souvent rejetées dans les rivières afin de les éloigner des villes, ce qui limite la possibilité de leur réutilisation agricole. A partir des années 1950 en France, l'essor des engrais de synthèse va induire l'indépendance des agriculteurs vis-à-vis des déchets urbains (Joncoux 2013). Cependant, à partir des années 1980, « la crise de la surproduction de l'agriculture et la prise de conscience des effets néfastes de la surfertilisation remettent en cause le paradigme du « tout chimique » » (Joncoux 2013).
En passant aux mains des gestionnaires de l'eau, la problématique des déchets organiques urbains devient environnementale.

Le décret de décembre 1997[4] et son arrêté d'application (janvier 1998) donnent aux boues un statut de **déchet**, et leur emploi agricole devient un recyclage et non une simple réutilisation (Nicourt et Girault 2003). La loi du 15 juillet 1975 définit un déchet comme étant « tout résidu d'une processus de production, de transformation, ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon », et ont une valeur marchande potentiellement négative (Lupton 2001). La gratuité de l'usage des boues donne alors à son utilisation par les agriculteurs une dimension de **service rendu à la société**, alors même que l'activité est régulièrement mise au ban des accusés sur le plan environnemental (Nicourt et Girault 2003), au travers de différentes polémiques (qualité de l'eau, élevage hors-sol, etc.).
En parallèle, la directive européenne du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux résiduaires urbaines, en imposant le traitement des eaux usées aux agglomérations, a entraîné l'augmentation de la production de boues de STEP, de même que l'interdiction en 2002 de mise en décharge des boues (Terrible, ECRIN 2000).
L'épandage agricole a connu, dans la décennie suivante, un fort développement :

- En 2003, 57% des 946 700 tonnes de matière sèche produite en France ont été valorisés en agriculture ;

- en 2007, 70% des 1 120 000 tonnes de matière sèche produite en France ont été valorisés en agriculture (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie 2009).

Afin de sortir les boues de la « logique déchets » et mettre en avant leur valorisation agronomique, des acteurs tels que l'ADEME préfèrent, au début des années 2000, promouvoir les boues comme des **produits résiduels organiques** (PRO) et les faire entrer alors dans une logique de produit en tant que matière première (Joncoux 2013).

Les boues vues au prisme des risques perçus

La qualification des boues en tant que déchet et son usage dans le processus de production agricole amène à les considérer au travers du prisme du **risque sanitaire** (la traçabilité) **et environnemental** (la protection des sols). Selon Nicourt et Girault (2003), la perception du risque de l'utilisation des boues de STEP comme intrant agricole est montée en puissance dans les années 1990 et a pour facteurs déterminants l'entrée en débat de la présence de métaux lourds dans ces boues et la mise en place par certaines grandes entreprises agroalimentaires de cahiers de charges limitant leur utilisation (notamment Bonduelle).
Terrible (2000) complète en détaillant divers éléments de contexte en lien avec la perception d'une agriculture industrielle et d'un environnement fragile, qui ont contribué à développer une perception du risque liée à la filière boue, et ainsi à mettre à mal la confiance de certains acteurs et du public dans cette filière : « la mise en application des nouvelles réglementations pour la protection de l'eau, l'augmentation des quantités de déchets à épandre, l'affaire de la vache folle, la question des OGM, la dioxine et les récents scandales de farines animales contenant des boues d'équarrissage » (Terrible, ECRIN 2000)
Les boues sont ainsi devenues un « **bien controversé** » (Lupton 2001), en cela que « la perception du problème ne provient pas d'une expérience directe du dommage par les agents, mais accède à la conscience collective à la suite d'une construction scientifique relayée ensuite par toutes sortes de médiations et ré-élaborées par plusieurs acteurs », et que plusieurs théories scientifiques sont en opposition sur ses caractéristiques et les répercussions de leur utilisation (selon Lupton (2001), les méthodes d'extraction, de dosage et de détection des micro-polluants organiques (HAP, PCB…) ne sont pas parfaitement au point, des incertitudes demeurent quant aux risques des métaux lourds sur la chaîne alimentaire par leur passage du sol à la plante, et enfin « les connaissances de l'effet des contaminants chimiques (métaux lourds et micro-polluants organiques) sur l'homme sont parcellaires, et les relations dose/effet ne proviennent pas de l'observation empiriques mais sont constitués à partir de modèles d'extrapolations dont les résultats divergent selon les hypothèses optimistes ou pessimistes »). Enfin, les dommages supposés par cette conscience collective ont un caractère perçu comme irréversible. Selon Lupton, « l'incertitude sur la sécurité sanitaire et environnementale d'un produit est caractérisée par un décalage entre la survenance du dommage et la cause » (Lupton 2001), ce qui est le cas pour les boues à destination de l'épandage.

Valeur symbolique des boues et de l'espace rural

[4] http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000739355

La valeur symbolique du matériau

Le terme boue provient du gaulois *bawa*, déduit du gallois *baw* pour désigner la saleté[5]. L'idée du déchet intrinsèque au caractère de ce matériau est donc bien antérieure au décret de 1997.
En termes de valeur symbolique des boues et de leur épandage, Nicourt et Girault mentionnent, d'une façon générale, le tabou des excréments humains. Selon Jeanjean (2000), « la réinjection des boues urbaines dans le circuit alimentaire peut évoquer le tabou de l'anthropophagie. Détachées des corps humains, les déjections n'en sont pas entièrement coupées ». Ainsi, les boues ayant subi un processus de transformation (le compostage par exemple) sont mieux acceptées car « pour qu'elles soient un tant soit peu acceptées, il faut d'abord les « innocenter » (pour parler comme Noélie Vialles), diluer leur identité » (Jeanjean 2000).
Enfin, Nicourt et Girault (2003) soulignent le caractère emblématique du déchet, et de l'épandage comme une marque de l'urbain sur le monde rural.

L'épandage au travers d'une vision ambivalente de l'espace rural

Joncoux (2013) souligne qu'au cours de la seconde moitié du XXème siècle, le développement d'engrais de synthèse plus simples d'utilisation et perçus comme plus sûrs, dans un contexte de séparation des problématiques des villes « hygiénisées » de celles des campagnes, amène les agriculteurs à délaisser eux-mêmes les déchets urbains, qui ne trouvent plus leur place dans le « nouvel ordre » agricole.
Joncoux décrit ensuite, lors des années 1980, le passage « du rural à l'environnement » : les campagnes, désormais accessibles aux citadins grâce au développement des transports, deviennent des lieux de loisir, de ressourcement, et même d'habitation perçus comme « purs » en opposition aux pollutions et risques divers propres à la ville. L'épandage des boues, avec les désagréments et risques perçus qu'elle comporte, peut alors faire l'objet d'une opposition des riverains et utilisateurs : « l'épandage des boues de STEP ou de lisiers devient alors de plus en plus problématique pour des citadins cherchant une campagne esthétisée, naturalisée » (Joncoux 2013).
A partir des années 2000, un phénomène d'écologisation du monde rural va cependant apparaître, se traduisant par une gestion intégrée de l'environnement et du secteur agricole, au travers des politiques publiques comme les mesures agri-environnementales, les sites Natura 2000 (lancés par l'UE dès 1992), etc. (Joncoux 2013). Nicourt et Girault (2003) mettent également en avant l'accentuation des demandes sociétales montantes envers les pratiques agricoles, notamment chez les populations urbaines ou rurbaines (de part le développement de l'agrotourisme pour les uns, l'installation à proximité de terres agricoles pour les autres…).

Les perceptions des différents groupes d'acteurs

La filière boues est soumise aux pressions de différents groupes d'acteurs, en lien avec leurs perceptions.

Les agriculteurs

Les perceptions des agriculteurs de l'épandage sont complexes et marquées par une tension entre logique agronomique, économique, commerciale et sociétale.
Les agriculteurs interrogés dans le cadre d'une étude ESA en 2003 se montraient inquiets quant à la présence de métaux lourds dans les boues, mais peu au regard de composés organiques ou d'éléments pathogènes (Le Guen, Morel, et Sigwalt 2003). Ces interrogés se montraient également sensibles à l'aspect, à la texture et à l'odeur des boues, percevant plus positivement les boues compostées.
D'après Joncoux, l'intérêt des agriculteurs pour les boues de STEP se trouve essentiellement dans leur gratuité et leurs qualités agronomiques. Ces motivations peuvent donc se trouver en complémentarité avec celles des producteurs de boues, mais toutes deux ne s'inscrivent pas dans une logique de gestion environnementale intégrée (Joncoux 2013). Ils peuvent cependant percevoir des risques patrimoniaux (dégradations durables de leurs terres dues à l'épandage), et commerciaux (la stigmatisation ou dévalorisation de leur production par des acteurs de l'agro-alimentaire ou de la distribution).
Enfin, Nicourt et Girault (2003) mentionnent que l'épandage place les agriculteurs en position de fournir un service public et considèrent que « l'épandage s'inscrit dans une stratégie de renégociation du contrat agriculture/société à travers l'échange de services ».

[5] http://www.cnrtl.fr/etymologie/boue

Le grand public

Selon une enquête de 2008 (Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine 2008), 68% des interrogés disent connaître les boues d'épuration. Pour 37% des sondés, les boues sont avant tout un déchet, et 17% la considèrent comme un recyclage. 70% des interrogés sont hostiles au recyclage des boues en agriculture. Les boues compostées sont moins connues, le terme compost étant le plus souvent associé à des déchets végétaux ou alimentaires. Celui-ci est globalement perçu comme plus écologique, moins odorant et moins dangereux que les boues.
Peu d'enquêtes globales permettent cependant d'attester des perceptions du grand public des pratiques d'épandage de matériaux issus de l'assainissement, outre le fait qu'elles sont aujourd'hui largement marquées par le prisme du risque, notamment depuis le début des années 1990 où elles ont acquis une visibilité en tant que vecteurs de risques (Lolive 2004), et en particulier du point de vue de la sécurité alimentaire comme expliqué plus haut.
Dans le cas des populations riveraines, Nicourt et Girault (2003) mettent en avant trois thématiques qui sensibilisent particulièrement ces personnes : « les nuisances (« odeurs insupportables »), les risques sanitaires et environnementaux, l'opacité et l'absence de maîtrise concernant la prise de décision et les mesures de contrôle », la première thématique étant liée à une perception directe du désagrément et les deux autres à une construction sociale d'une représentation de l'objet boue comme étant « risqué ».

Les élus

Les élus locaux peuvent être soumis à d'importantes pressions face aux décisions concernant l'épandage de boues de STEP.
Le rapport de l'Association des maires de France sur l'épandage des boues de STEP (2007) souligne d'ailleurs « la très grande réactivité du monde agricole, soumis à de fortes pressions environnementales et commerciales de la grande distribution, de l'agro-industrie et de certains coopératives », ainsi que le « contexte tendu en matière de sécurité alimentaire associé à une méfiance du consommateur auquel viennent parfois s'ajouter des discours marketing sans fondement scientifique », une « grande segmentation des acteurs doublée d'une complexité des systèmes (monde de l'eau et des déchets, fiscalités propres, structures, réseaux & sensibilité… », et enfin une « importante composante irrationnelle (les boues sont issues du traitement des résidus de l'activité humaine contenant nos déchets intimes) qui complique singulièrement la mise en place de solutions durables » (Association des Maires de France et ACONSULT 2007).
Joncoux (2013) souligne que les élus peuvent également craindre d'être impliqués dans une affaire de sécurité environnementale, qui mettrait en doute leur légitimité locale et nationale. Selon Jeanjean : « Les élus locaux sont pris dans des relations de voisinage et d'interconnaissance. Ils sont exposés et il est difficile pour eux, s'ils veulent maintenir leur pouvoir, d'assumer l'épandage par exemple. Le développement de cette pratique nécessite l'intervention d'une autre autorité politique, plus éloignée du niveau local. C'est sur l'État, par le biais de l'autorité préfectorale, que les techniciens et industriels comptent pour imposer aux élus locaux l'utilisation des boues urbaines sur leur commune » (Jeanjean 2000).

Les industries agroalimentaires et acteurs de la distribution

Certains industriels agro-alimentaires et grandes surfaces ont contribué au développement de contraintes commerciales sur la filière épandage :

- Certains interdisent l'épandage ou le limitent à l'aide de chartes (ex : Bonduelle qui, en 1997, a imposé à ses 2200 fournisseurs une charte d'approvisionnement des légumes transformés et commercialisés, préconisant des qualités de boues plus sévère que la réglementation nationale) (ECRIN 2000), développement de cahiers des charges « anti-boue » (interdits pour les industries ayant un label public, de type Label Rouge, AOP, CCP ; surveillé pour les marques privées)

- Certaines grandes surfaces et industries transformatrices ont mis en avant des arguments commerciaux (« garanti sans boue »), pour se démarquer de la concurrence et évoquant le principe de précaution, dont le succès repose sur les représentations du grand public. Selon Barbier et Lupton (2003), les boues peuvent être vues, du point de vue des sciences sociales, comme « une arme commerciale, permettant à certaines filières de se démarquer à peu de

frais en proposant aux consommateurs des « produits sans boues ». Les actes de publicité négative sont cependant interdits par la DGCCRF (« De bout en bou(es) » 2007) (ECRIN 2000).

Il en a résulté une limitation des débouchés pour la filière boues. Par ailleurs, le risque commercial perçu par les agriculteurs est en lien direct avec les représentations du grand public, en cela qu'il pousse les marques et enseignes à mettre en avant l'absence de boues dans les filières de production en tant qu'argument commercial, venant à leur tour alimenter la perception négative des boues, et notamment en termes de risques pour le consommateur. Les assertions des industries agroalimentaires et distributeurs constituent parfois le premier et seul prisme par lequel une partie du grand public perçoit les boues, comme le soulignent Barbier et Lupton (2003) : « l'attitude des consommateurs est mobilisée dans l'argumentaire de justification, sans que ceux-ci soient encore informés des pratiques d'épandage ».

Les acteurs de l'écologie

Les acteurs de l'écologie (associations de défense de l'environnement, collectivités compétentes en gestion des milieux, etc.) peuvent émettre des réserves ou oppositions en lien avec les risques de contamination des sols (métaux lourds, composés organiques persistants…). Ils ont sinon un positionnement plutôt favorable car l'épandage évite l'utilisation des engrais chimiques. En outre, en l'absence d'épandage, les boues de STEP sont incinérées ou mises en décharge, ce qui cause d'autres pollutions (« De bout en bou(es) » 2007).

Les logiques d'action autour des perceptions des boues

Les boues sont l'objet de controverses techniques et sociales, et la perception des boues selon les statuts décris précédemment amène les acteurs à s'organiser et à agir selon différentes logiques.

Les déterminants de l'action des agriculteurs

L'étude menée par l'ESA en 2003 sur des agriculteurs bretons et ligériens a montré que la perception directe des boues par les agriculteurs ne détermine pas toujours le choix d'épandre ou non (Le Guen, Morel, et Sigwalt 2003). Quatre autres types d'influence ont été identifiés :

- Les groupes professionnels locaux (rupture de l'isolation de l'agriculteur face à la problématique de l'épandage, notamment au travers de la constitution de collectifs) ;
- Le champ professionnel agricole (alors que les positions officielles des chambres consulaires peuvent être peu déterminantes dans les décisions des agriculteurs, une influence demeure au travers des actions d'information, d'autant plus que le niveau d'information sur l'épandage est souvent faible localement) ;
- Les acteurs économiques d'aval (pérennisation de leurs débouchés) ;
- Les dynamiques sociales communales (maintient de bonnes relations de voisinage, inversion de la charge symbolique négative dont les agriculteurs se sentent parfois victimes, etc.).

(Le Guen, Morel, et Sigwalt 2003)

Les logiques d'action des autres acteurs

Nicourt et Girault (2003) s'intéressent à l'organisation à l'échelle territoriale d'un refus de la filière boue. Ils décrivent, à partir d'un cas d'étude, le blocage des riverains opposés à l'épandage selon une logique NIMBY, leur organisation en associations locales, puis en réseau d'associations poursuivant une logique plus globale, une construction d'un discours argumenté par des cautions scientifiques et une dimension communication (pétitions, interventions dans les enquêtes publiques, mobilisation d'un discours scientifique, instrumentalisation éventuelle de la presse locale). Ces organisations ont le pouvoir et l'objectif de peser dans les enquêtes publiques relatives aux plans d'épandage. Le refus local de l'épandage de boues peut également passer par les exploitants agricoles, qui dans ce cas d'études était conditionné par le positionnement de principe de leur Chambre d'agriculture, alors opposée à cette pratique.

Face à ce type d'oppositions, des actions de promotion et d'encouragement à l'épandage sont mises en place. Le principal outil de compensation pour les agriculteurs est un fonds de garantie mis en place en 2009 pour les indemniser en cas de dommages liés à l'épandage de boues de STEP urbaines. Il est alimenté par les producteurs de boues, à hauteur de 0.50€ par tonne de matière sèche produite (« Epandage agricole des boues d'épuration : le système d'indemnisation précisé » 2015).
Par ailleurs, le Syndicat des professionnels du recyclage en agriculture (SYPREA) mène des actions pour améliorer la confiance dans la filière épandage encadrant les pratiques de production et certifiant les produits (Nicourt et Girault 2003).
Sur le volet communication, la Mission recyclage agricole du Haut-Rhin a animé dès 1997 une campagne de sensibilisation sur le recyclage agricole des boues de STEP (« Tabou(e) Story »), d'abord à destination des professionnels concernés et qui a commencé à s'orienter vers le grand public à partir de 2004 (Association des Maires de France et ACONSULT 2007).

Conclusion

L'épandage des boues issues de l'assainissement est une pratique ancienne, mais qui a acquis une visibilité auprès du grand public depuis les années 1990, à laquelle se sont associées des perceptions des risques à différents niveaux (du plus local auprès des riverains au plus global via de grandes marques agroalimentaires et enseignes de distribution). Cette vision des boues comme représentant des risques (sanitaires, environnementaux, commerciaux, etc.) se nourrit de certaines incertitudes sur le plan scientifique d'une part (substances non mesurées réintroduites dans la chaîne alimentaire, impacts à long terme sur les terres, etc.) et de stratégies commerciales de certains acteurs au potentiel de communication élevé d'autre part, qui viennent alimenter les représentations, puis les choix des différents acteurs qu'elles touchent (agriculteurs pour les Chambres d'agriculture, consommateurs pour les industries et distributeurs, riverains pour les collectifs locaux, etc.) vis-à-vis de la filière boues (incluant ses différents produits : boues, compost de boue, etc.).

Les déchets verts

La décomposition naturelle de la nécromasse végétale et son utilisation par l'Homme

La notion de « déchets verts », majoritairement utilisée dans les milieux urbains, concerne des végétaux dans leur entier ou en partie. Il peut ainsi s'agir de branchages, de feuilles mortes, de fleurs fanées. Le terme « déchet vert » étant teinté de subjectivité, dans un souci d'un travail objectif sur la perception, nous utiliserons le terme plus scientifique de « nécromasse végétale ». Le terme « nécromasse », désignant la masse totale de toutes les espèces mortes présentes en un milieu naturel donné, en opposition au terme « biomasse », est ainsi mis en relation avec le terme « végétal » qui exclue la nécromasse animale de notre champ d'étude.
La nécromasse est essentiellement d'origine non anthropique : les végétaux ont un cycle de vie, leur croissance impliquant un stockage de matière organique (carbone, hydrogène, azote, oxygène…) dans leur organisme. Une fois le végétal en fin de cycle soit par une cause naturelle (apoptose ou mort cellulaire programmée) ou extérieure (impacts d'animaux, de conditions climatiques…), celui-ci meurt et la matière organique dont il est constitué se décompose par l'action combinée des animaux, des bactéries, des champignons du sol… Ainsi se forme la couche supérieure du sol, l'humus.
Pour répondre à ces besoins, l'homme produit lui-même de la nécromasse végétale : cultiver des espèces végétales pour se nourrir, couper du bois pour se chauffer, fabriquer des objets, des vêtements. Une diversité de processus permet ainsi de conserver cette nécromasse et d'éviter qu'elle ne se décompose trop précocement afin que l'homme puisse profiter au mieux de ses potentialités. Même une nécromasse se décomposant est apparu comme utile à l'homme : Les pratiques agricoles évoluant, les hommes se sont rendu compte de l'impact positif que pouvaient avoir « l'ajout » de nécromasse végétale décomposée sur leurs parcelles en termes de valeur fertilisante (Warman, 1981).

La place de l'arbre en ville au cours de l'Histoire

Nous aborderons la thématique des végétaux en ville sous le prisme de l'arbre en ville, principal angle d'attaque des publications. Outre la valeur symbolique qu'offrait l'arbre lors de la période antique et moyenâgeuse, l'arbre était peu considéré dans l'aménagement des villes (Le Gourierec 2012 in Mollie 2009). Ces arbres isolés ou groupes d'arbres étaient présents pour faire de l'ombrage sur les places notamment. Peu à peu la fonction utilitaire de l'arbre lui a permis d'occuper une place plus importante près des lieux de vie (fruits, chauffage, menuiserie…).

Au 17e et au 18e siècle, l'arbre commence à devenir une réelle composante du paysage urbain nécessitant une réflexion dans l'aménagement. En Italie, les Médicis ont impulsé les « allées promenades », idées reprises entre autres par Le Nôtre à Versailles et autour de Paris. Afin d'échapper à « l'étouffant carcan des remparts », ces derniers sont dérasés pour aménager des espaces de loisirs urbains ouvrant la ville vers la campagne. Au 19e siècle, les arbres faisaient partie intégrante des projets urbains comme cela a été le cas pour les réalisations d'Haussmann et Alphand, qui souhaitaient effacer l'image d'une ville de pierre, avec notamment l'aménagement des parcs de Montsouris et du Luxembourg et la plantation de 80 000 arbres à Paris (Le Gourierec 2012, in Viatte, 2002). Alors que les Ormes les tilleuls dominaient, Paris se diversifie avec l'implantation de cèdres, platanes et marronnier (Werquin, 1995).
Après les bombardements de la Seconde Guerre mondiale, les priorités sont à la reconstruction de logements et de voiries. Les réflexions sur la place de l'arbre en ville se sont étiolées progressivement et l'avènement d'une pensée fonctionnaliste combinée à l'avènement du « tout automobile » qui suivit acheva de reléguer l'arbre au dernier rang des préoccupations de l'aménagement urbain (Le Gourierec, 2012). La perte de savoir autour de l'arbre urbain qui en a découlé a mené des pratiques de gestion traumatisantes pour les arbres urbains comme des élagages sévères, des entretiens ponctuels et souvent réalisés dans l'urgence. Le patrimoine arbustif légué par cette période a été peu intéressant, les plantations étant de mauvaise qualité. Avec la montée en puissance des préoccupations environnementales à partir des années 80, les urbains, habitants et politiques commencent à se rendre compte du vide créé par le manque d'arbre et du peu d'attractivité d'un univers bétonné.

Les services écosystémiques rendus par l'arbre, mais également… des desservices

Un changement de perception s'est donc opéré au cours du XXe siècle sur la place à accorder aux arbres et plus largement aux végétaux dans l'espace urbain. Une réflexion sur les services écosystémiques rendus par les végétaux en ville. En 1999, Bolund et Hunhanmmar en définissent six : la filtration de l'air, de la régulation du microclimat, la réduction du bruit, le drainage des eaux de pluie, le traitement des eaux usées, les valeurs culturelles et récréatives. Les services de rafraîchissement, d'épuration de l'air et de drainage des eaux représentent les intérêts les plus directs. Les habitants des villes et donc les élus étant de plus en plus préoccupés par certains indicateurs environnementaux des villes, ces services écosystémiques prennent une résonnance particulière. Concernant la pollution de l'air, les villes sont de plus en plus attentives aux indices atmosphériques (poussière, dioxyde d'azote, ozone, particules fines…) principalement altérés par les transports et le chauffage. D'autre part, le réchauffement climatique impactera de plus en plus fortement les villes, véritables « îlots de chaleur », les capacités de refroidissement des arbres apparaissent donc comme salvatrices. En 1997, Taha montre que l'évapotranspiration urbaine des végétaux peut créer des « oasis de fraicheur », la température se réduisant de 2 à 8°C par rapport aux environs.
Malgré l'impressionnante liste des services écosystémiques rendus par les arbres, leur implantation ne semble pas si simple pour les gestionnaires de l'espace urbain. En effet, il ne faut pas oublier certains « desservices » écosystémiques (Escobedo et al, 2010) qui peuvent être financiers (usage des sols, travail, capital), ou bien relatifs à des nuisances sociales (allergène, sécurité liée aux chutes…) ou des aspects environnementaux (quantité et qualité de l'eau, introduction d'espèces invasives…). Certains de ses desservices qui pourraient aujourd'hui paraître négligeables pourraient prendre de l'importance avec les impacts du changement climatique, par exemple les besoins en eau des végétaux pourraient entrer en concurrence avec des besoins en eau pour l'eau potable.

Le changement de perception autour des taillis de végétaux urbains

En milieu rural, la nécromasse végétale a toujours été perçue comme une ressource, celle-ci étant utilisée pour nourrir les animaux, alimenter un feu, améliorer le sol…
Jusqu'à une certaine époque, la nécromasse urbaine, constituée principalement de branchages, feuilles mortes et fleurs fanées n'était pas une préoccupation particulière des gestionnaires : les habitations étaient pourvues de cheminées et la nécromasse disponible pouvait servir à alimenter les feux. Les feuilles mortes tombées à terre n'ont pas été source de préoccupation jusqu'à l'apparition des automobiles en ville.
C'est bien avec le développement des automobiles que les premières notions de gestion poussée des végétaux urbains apparaissent : les branches devaient être taillées pour laisser les passages, les feuilles devaient être déblayées afin d'éviter les risques de dérapage des voitures... Le règlement sanitaire départemental type de la France, fait mention de « résidus verts » qui pointe des règles à respecter afin de limiter les risques de nuisances ou de pollution des eaux dès 1979. Puis

l'assimilation de ces résidus à une forme de « déchet » apparait dans la circulaire du 25/09/90 relative à la définition et la réglementation des déchets de jardin. Les termes de la circulaire hésitent encore entre « déchets d'espaces verts et des jardins », « résidus verts », « déchets verts », « déchets végétaux ». Le mot déchet, apparût au moyen-âge provient du verbe « déchoir », la définition donnée à ce moment-là étant « quantité qui est perdue dans l'emploi d'un produit » (Trésor de la langue française).Ce changement de statut symbolise le passage d'une société aux conceptions rurales, basée sur une optimisation de l'utilisation des ressources, à une société aux conceptions urbaines, plus préoccupée par l'aspect fonctionnel.

Une réappropriation des déchets verts urbains par les gestionnaires

La gestion de la nécromasse végétale ne préoccupait pas particulièrement les gestionnaires, le développement de la collecte des ordures ne procédant pas particulièrement à un tri. La nécromasse végétale était alors enfouie ou bien plus ponctuellement incinérée par les collectivités. La législation française a alors évolué :
Comme le rappelle la circulaire NOR DEVR1115467C du 18 novembre 2011 relative à l'interdiction du brûlage à l'air libre des déchets verts, l'article 84 du règlement sanitaire départemental type, qui constitue la base des règlements sanitaires départementaux édictés par les préfets, interdit le brûlage à l'air libre des ordures ménagères dont les déchets verts font partie. Cette méthode était privilégiée par les particuliers qui pouvaient sécher leurs déchets verts, les brûler puis récupérer les cendres pour amender le sol. Cette option n'étant plus envisageable la gestion des déchets verts des particuliers a alors incombé aux collectivités qui ont parfois mis en place des collectes de déchets verts. Il fallait trouver un moyen de valorisation de ces déchets verts, des études ont alors montré que la solution la plus pertinente du point de vue technique, environnemental et économique étant celle du compostage (Larrue, 1999).
Une directive de 1999 (1999/31/CE du Conseil du 26 avril 1999), préconisant des objectifs de réduction (en poids) de la quantité de déchets municipaux biodégradables mis en décharge, enclenche des initiatives de projets pilotes sur la gestion des déchets verts. Les collectivités se dotent alors de plateforme de compostage afin de valoriser de manière plus naturelle les déchets verts urbains.
Au début des années 2000, le compost issu de déchets verts est donné aux agriculteurs. Puis la prise de conscience des collectivités autour de la valeur du compost les a menés à améliorer la qualité du compost produit et à le vendre aux agriculteurs.
Le cas d'étude de la coopérative céréalière de la plaine de Versailles illustre ce revirement de situation (Joncoux 2013). Les acteurs du territoire concernés par l'aspect qualitatif du compost constatent son amélioration au cours des années (tamisage, produit plus travaillé…), ce qui justifie la commercialisation du produit. Des initiatives de ce type sont encore minoritaires, en effet les techniques de compostage et les compétences commerciales ne sont pas du ressort des collectivités. Il s'agit donc pour les collectivités de faire le choix de s'impliquer dans un tel processus ou de trouver des structures à qui elles peuvent déléguer les aspects techniques et commerciaux.
À partir des années 2010, la réglementation française souhaite encourager une perception positive des déchets verts, qui devraient être perçus comme des ressources. L'article R541-8 du code de l'environnement du 11 juillet 2011 introduit la notion de biodéchet incorporant «les « déchets verts ».
Le 1er janvier 2012, une nouvelle réglementation en faveur de la valorisation des déchets voit le jour : l'article L 541-21-1 du Code de l'environnement oblige les producteurs ou détenteurs de quantités importantes de « biodéchets » à mettre en place un tri à la source et une valorisation.

À l'avenir, les collectivités pourront percevoir les déchets verts comme un avantage comparatif supplémentaire : en 2020, les collectivités ne pourront plus épandre de produits phytosanitaires dans les espaces verts publics. Afin de préserver ces espaces verts des « mauvaises herbes », les collectivités devront donc trouver des solutions plus écologiques. Depuis quelques années, de nombreuses villes ont adopté le paillage, c'est-à-dire la mise en place d'une couverture végétale morte (brindilles, écorces…) sur la terre à nue autour des plantations. Ce paillage pouvant être réalisé à partir de déchets verts empêche ainsi le développement non voulu de certaines plantes.

Les conclusions

Les contraintes liées à la gestion des déchets verts par les collectivités, implique que ceux-ci ne sont pas encore considérés comme une ressource à part entière. Ils resteraient comme des déchets qui doivent être ramassés, stockés, gérés et qui accessoirement peuvent être valorisés, au même titre

que les déchets recyclables, et même rapporter un peu d'argent à la collectivité (vente de compost, achat évité de produits phytosanitaires ou de matériel de désherbage thermique).
Une étude anthropologique menée à Amiens (Blot, 2012), montre que les perceptions des habitants autour des déchets verts dans un certain contexte peuvent être particulièrement négatives. Ainsi les déchets verts constitués d'amas de branches, branchages et feuilles flottant dans une rivière sont perçus comme « sales » par les habitants et par les agents des espaces verts. Même si ces matériaux pourraient être considérés comme utiles à l'équilibre écologique de la rivière, leur collecte apparait nécessaire.
Aujourd'hui la société semble être dans une phase transitoire quant à la perception de ces déchets verts. Les sentiments écologiques grandissants n'ont pas encore amené une sensibilisation assez forte pour que le déchet vert soit considéré comme une ressource à part entière. À l'échelle du particulier ou de la collectivité, la gestion des déchets verts apparait comme nécessaire par rapport aux desservices affiliés mais est majoritairement perçue comme une contrainte.

VII.3.c. Les consultations et analyses réalisées à partir d'ateliers grand public et acteurs locaux

Pour évaluer l'acceptabilité des matériaux et mélanges, et saisir ainsi les perceptions et représentations qui y sont associés, deux principales activités ont été développées :
1) L'analyse de la perception / représentation des matériaux et des sols construits, par les citoyens au travers de focus groupes.
L'objectif de cette analyse vise à caractériser de la manière la plus objective possible l'opposition ou l'acceptation sociale associée à chacun des matériaux et au principe de construction d'un sol afin de prendre en compte ces enseignements dans l'outil d'aide à la décision. Pour ce faire, cinq focus groupe réunissant une soixantaine de personnes ont été réalisés à Colmar et Strasbourg.
2) L'organisation et l'animation d'un atelier d'acteurs locaux "dessine-moi ta filière" à la Communauté urbaine du Grand Nancy (Grand Nancy). Cet atelier a permis de mobiliser des acteurs potentiellement impliqués dans le cadre de la filière « sol construits ». Cette instance d'échange et de partage a réuni la collectivité en tant qu'utilisateur, plus précisément le service « espaces verts », des entreprises de la filière classique et de la nouvelle filière.
Cet atelier a eu plusieurs objectifs:

- Identifier les besoins des utilisateurs potentiels
- Présenter et évaluer l'intérêt des utilisateurs pour l'outil d'aide à la décision
- Recueillir les avis des différents fournisseurs potentiels sur le projet SITERRE et comprendre leurs intérêts/réserves/contraintes par rapport à la nouvelle filière.

Une analyse préalable composée d'entretiens et de recherche autour de la filière et des gisements de matériaux a été réalisée en amont de l'atelier. Il a permis de comprendre le fonctionnement de la filière actuelle et de cibler les gisements de matériaux dans un rayon de 100 km autour du Grand Nancy. Ces informations ont permis d'ajuster les potentiels conditions de mise en œuvre de la filière « technosols » et d'affiner ainsi les simulations proposés par l'outil d'analyse multicritères (coûts, transport, disponibilité des matériaux etc.).
L'analyse sociétale réalisée, que ce soit au niveau des *focus group* et de l'atelier d'acteur, permet de s'approcher au plus près des besoins existants. Elle apporte une plus-value opérationnelle dans la co-construction d'une nouvelle filière.

VII.3.d. Analyse des perceptions du grand public issue des focus group

Précisions sur la méthode des *focus group*:
Un *focus group*, ou groupe de discussion, est une discussion structurée en plusieurs phases autour d'un script prédéfini au sein d'un petit groupe de citoyens (jusqu'à 12 personnes) répondants à des critères précis et animée par un modérateur neutre et objectif. La discussion interactive du groupe dans un cadre non contraignant et détendu permet d'obtenir des informations sur les préférences et valeurs des personnes concernant un sujet défini. Il s'agit là de l'essence même de ce processus participatif (et de sa valeur ajoutée par rapport à des entretiens individuels), où les participants sont amenés à se situer d'abord individuellement puis de réagir par rapport aux opinions et aux affirmations des autres. Les *focus group* sont donc utiles pour :
i) Prendre connaissance et évaluer la diversité des vues et opinions sur un sujet, les confronter et voir leur évolution éventuelle suite à l'ajout d'informations nouvelles ;
ii) Comprendre le raisonnement qui sous-tend une opinion. Contrairement à l'administration d'un questionnaire, qui ne livre que des faits détachés du contexte et pas toujours explicites ou parlants, les focus groupes peuvent mettre en évidence les questions sensibles ou les points critiques ;
iii) Donner aux participants la possibilité d'exposer et d'expliquer leurs demandes et leurs attentes et déterminer le degré de consensus existant sur un sujet donné.
Les *focus group* offrent la double possibilité de :
i) permettre aux personnes mobilisées d'appréhender les matériaux utilisés dans SITERRE de manière physique (texture, couleur) ;
ii) permettre une analyse des perceptions et des représentations avant et après que des informations objectives aient été présentées et ainsi cibler des conditions d'acceptabilité.

L'analyse des *focus group* a permis de faire émerger six types d'analyses résumées dans le schéma suivant.

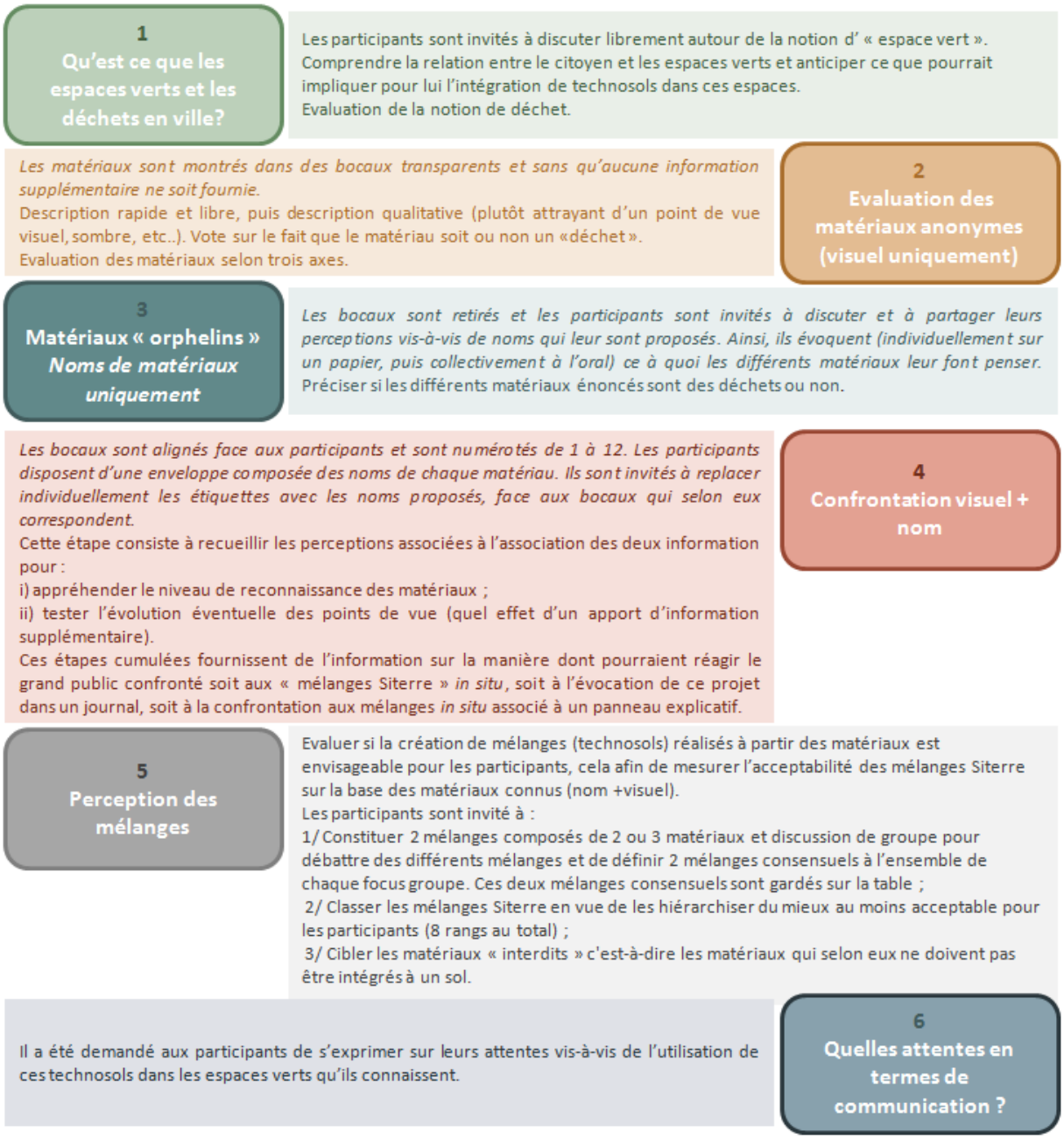


Figure 129 : Les étapes et dynamiques d'analyse autour de l'acceptabilité sociale des matériaux et mélanges

La synthèse des principaux résultats permet d'appréhender la connaissance des acteurs autour des matériaux et des mélanges SITERRE mais aussi de cibler les conditions d'acceptation qu'il faudra considérer pour une mise en œuvre opérationnelle des technosols.

L'analyse des perceptions et des préjugés relatifs aux espaces verts et aux déchets en ville

Les participants ont majoritairement décrit l'espace vert par rapport à des références vécues. L'espace vert étant un espace familier, bien appréhendé, associé à la ville. Lieu de repos, arboré, entretenu, cadré, l'espace vert est un secteur ou le citadin peut retrouver du calme, du « vert », un contraste par rapport au reste de la ville, une autre perspective. Les déchets ou nuisances qui peuvent être rencontrés dans les espaces verts n'ont pas du tout été abordés. La notion d'espace vert est donc associée à des idées positives dans l'imaginaire collectif. Il en est de même pour les matériaux utilisés/retrouvés dans ces espaces. Par ailleurs, la notion d'espace vert ne renvoie au premier abord qu'à la notion de parc ou de jardin. Le grand public appréhende ainsi un ensemble moins grand que celui du champ d'action des services « espaces verts » des collectivités.

L'analyse des perceptions relatives aux matériaux « anonymes »

Cette étape vise à évaluer les préjugés et ressentis associés au visuel (les matériaux sont montrés dans des bocaux transparents) et sans qu'aucune information supplémentaire ne soit fournie.
En effet, le premier rapport que les citoyens auraient avec des mélanges alternatifs serait visuel étant donné en tant que promeneur dans les parcs ou dans les rues auprès des arbres d'alignement où ces sols seraient utilisés. Comprendre ce qu'ils en perçoivent a priori - sans que le nom du matériau ne soit introduit ni que ce dernier ne soit expliqué - est donc une question importante. La première étape du processus consiste donc à tester les matériaux (pas encore les mélanges à ce stade) de manière anonyme et spontanée.

Méthodologie de l'évaluation de perception :
Les matériaux, sans description ni nom associé, sont présentés un à un dans des bocaux transparents aux participants. Cet exercice est donc assez éloigné des conditions réelles où les matériaux seront mélangés en grande quantité et intégrés au reste du paysage.
Il leur est demandé dans un premier temps de les décrire rapidement et librement, puis de les décrire qualitativement (plutôt attrayant d'un point de vue visuel, sombre, etc..) et de voter à l'aide de papier de couleur (rouge pour non, vert pour oui) sur le fait que le matériau soit ou non un « déchet » (le terme de déchet est défini au préalable.
Dans un second temps, les matériaux sont évalués. Il est demandé aux participants de noter sur des axes gradués de -3 à +3 les différents matériaux, selon trois dimensions représentées sur des axes :
Le 1er sur l'aspect visuel, cherche à savoir si la matière est plutôt repoussante ou alors attrayante ;
Le 2nd sur les effets possibles de cette matière sur l'environnement : nuisible ou au contraire bénéfique.
Le 3ème sur la confiance que les participants accordent a priori au matériau présenté : appréhension ou confiance.
Si les participants sont neutres ou sans préjugés vis-à-vis de cette matière, ils placent leur note autour de zéro.
Chaque matériau est présenté dans des bocaux transparents (12 matériaux au total) et sans qu'aucune information supplémentaire ne soit fournie.

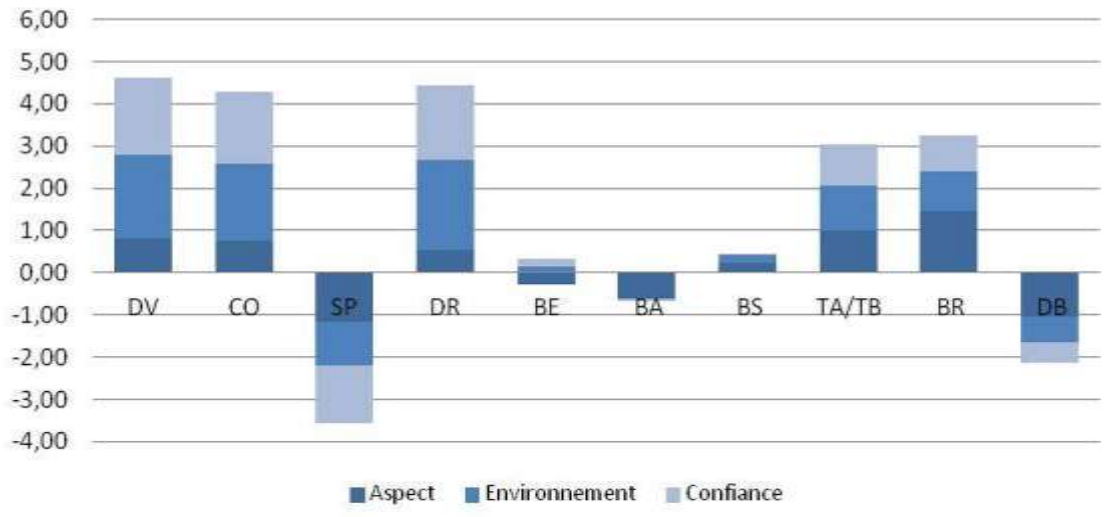


Figure 130 : Perception et évaluation visuelle des matériaux sans noms associés

L'analyse des perceptions vis-à-vis des matériaux « orphelins » (sans visuel ni explication associée)

Les termes plus familiers sont généralement mieux perçus, notamment pour la sciure de bois, le compost et les déchets verts. L'aspect rédhibitoire de certains noms est notable surtout pour les déchets de rue (DR) et les boues de STEP papetières (BS et BP). Cela traduit une relative méconnaissance vis-à-vis de la définition de ces mots, de leur provenance, aspect visuel ou

composition. En effet, la grande majorité des participants n'a aucune idée de l'aspect visuel que peuvent avoir ces matériaux ni des impacts et procédés d'extraction de ces derniers.

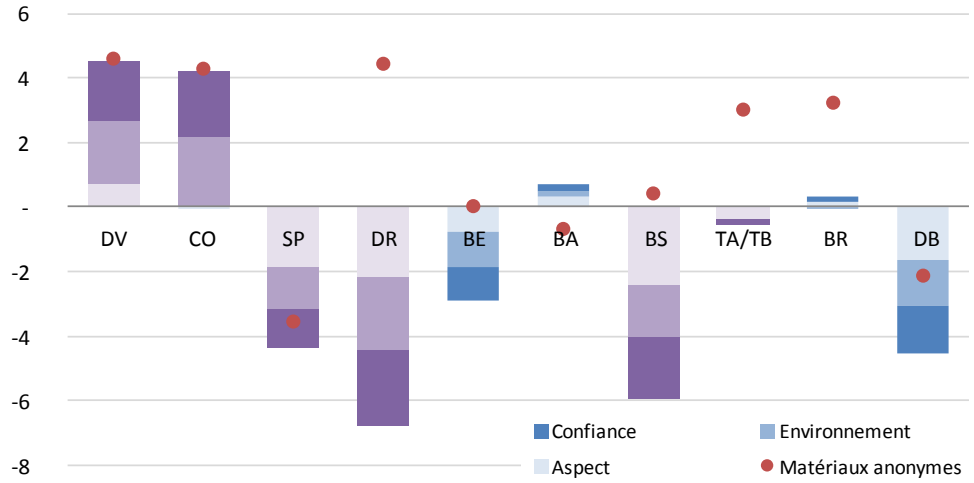


Figure 131 : Évaluation des matériaux à partir de leur nom uniquement (sans visuel associé)

L'évaluation des perceptions lors de la confrontation du visuel aux noms

Cette étape distille des indications sur la provenance des matériaux et facilite la compréhension de l'évolution des perceptions et des jugements des participants. Elle permet ainsi d'évaluer la reconnaissance des matériaux et l'évolution de la perception en découvrant l'origine de ces derniers.

La reconnaissance des matériaux

Le taux de reconnaissance des matériaux (c'est-à-dire la capacité des participants à associer le bon nom au bon bocal) est relativement faible dans l'ensemble, ce qui témoigne à la fois d'une méconnaissance de certains matériaux (exemple boue papetière (SP) ou ballast (BA)), d'une certaine hétérogénéité des matériaux (exemple déchet de rue (DR), ou la boue de STEP qui peut avoir un aspect différent selon son niveau de séchage) et d'une difficulté d'association : on peut connaître ce qu'est une boue de STEP sur le principe et n'en avoir jamais vu.
Le tableau suivant illustre le taux de reconnaissance des matériaux (synthèse des cinq *focus group*). Si moins de 33% des participants ont associé le bon nom au bon bocal, le matériel apparaît avec un "rond" rouge ; orange si le taux d'association correcte est entre 33% et 66% et vert si la reconnaissance est à plus de 66%.

1 - DV	39%
2 - CO	37%
3 - SP	17%
4 - DR	19%
5 - BE	45%
6 - BA	34%
7 - BS	2%
8 - TA/TB	40%
9 - BR	98%
10 - DB	44%

Figure 132 : Taux de reconnaissance des matériaux

Cette analyse souligne que seule la brique est bien reconnue par les participants (98%). Au contraire, les boues de STEP ont un taux de reconnaissance très faible (2%), suivies des boues papetière et des déchets de rues qui s'illustrent comme étant les matériaux les moins connus pour l'ensemble des participants.
On constate que les matériaux minéraux sont globalement mieux reconnus que les organiques.

Il semble également que plus le matériau, de par son visuel ou les préjugés autour de son nom, est connu, plus la perception est confirmée : bonne pour déchet vert et compost, neutre pour la brique et le béton.
L'hétérogénéité des matériaux peut être un facteur rendant difficile la reconnaissance des matériaux. C'est le cas par exemple des déchets de rue, qui peuvent être composés différemment selon leur point de collecte et donc avoir un visuel différent. Dans le cas de nos focus groupes, le bocal relatif aux déchets de rue était « propre », ressemblait fortement à de la terre de bruyère et sans « déchets de rues » connus et visibles (mégots, chewing gum). Dans ce cadre, l'association entre le visuel et le nom a été très difficile.
Il en va de même pour les boues de STEP qui peuvent varier dans leurs aspects selon le procédé d'obtention (séchage, etc.) mais il semble que cela ne soit pas un facteur perturbant la reconnaissance car les participants dans leur majorité n'ont pas d'images associées à ces matériaux.

L'évolution des matériaux

En découvrant l'origine, les participants furent surpris par certains matériaux, car leur nom est associé à un préjugé négatif et le visuel crée une appréhension plutôt positive. C'est surtout le cas des déchets de rue.
Les perceptions évoluent très peu pour les déchets verts, le compost, tous deux constamment évalués de manière positive, de même pour les boues papetières évaluées négativement tout au long des différentes évaluations. Cela souligne une constance de la perception pour ces trois matériaux.
L'association nom + visuel a tendance à modérer la note globale (généralement moins basse que pour le nom seul) : cela sous-entend que le visuel des matériaux influence la perception. Cette relative « modération » des évaluations est notable pour les déchets de rue, le béton, les boues de STEP et dans une moindre mesure, les terres excavées.
Les déchets de bâtiments restent négativement perçus, le visuel permettant cependant d'améliorer un peu la perception globale du matériau.
Le ballast est quant à lui moins bien évalué que dans les exercices précédents, sans que l'on puisse véritablement l'expliquer mais globalement, l'ensemble des notes permet de qualifier une évaluation « neutre ».

L'analyse de l'acceptabilité des matériaux et des mélanges, y compris des mélanges proposés dans le cadre du projet SITERRE

Les participants pensent unanimement qu'il est possible de reconstituer un sol (technosol) à partir des matériaux qui sont proposés pour une utilisation en espace vert. Seuls quelques participants émettent des réserves. Les réponses à cette question sont rapides et spontanément positives. Aucune réserve à proposer un tel usage n'est émise par les participants.

Évaluation des mélanges SITERRE

Les mélanges SITERRE sont présentés aux participants, il leur est demandé de les hiérarchiser, du mieux équilibré / acceptable, au pire via un classement de 1 à 8. Le tableau suivant propose une synthèse des notations sur les 5 focus groupes pour les 6 mélanges SITERRE. La note représente la moyenne des notes attribuées (entre 1 et 8) faite par les participants qui a permis d'établir les rangs du classement.

Mélange	Moy	Rang
TA+CO	2,40	1er
BR+CO	2,73	2nd
BA+CO+DR	4,72	3ème
TA+BE+DV	5,34	4ème
TA+BA+BS	5,75	5ème
BA+SP	6,63	6ème

Figure 133 : Hiérarchisation des mélanges SITERRE

La terre excavée et le compost (tous deux matières organiques) apparaissent au premier rang. Ce classement est surprenant par rapport aux évaluations faites vis-à-vis de la terre excavées dans les activités précédentes. Il semblerait que finalement l'aspect visuel du mélange proposé ait prédominé sur le jugement final. Le reste des mélanges présentent une dynamique organique-minéral et l'utilisation du compost semblerait conditionner le classement.
Les mélanges BA+SP et TA+BA+BS, sont les mélanges les moins acceptables de par la couleur du mélange et les matériaux qui les composent, les participants ayant d'importants préjugés et des doutes vis-à-vis des boues. Ces doutes résultent notamment d'une méconnaissance apparente du processus de traitement et d'obtention de ces boues.

Les matériaux « interdits » : un rôle important dans le choix du mélange ?

Il est demandé aux participants d'indiquer les matériaux interdits, c'est-à-dire les matériaux qui selon eux ne doivent pas être intégrés à un sol.
Chaque matériau reçoit une note, illustrant le nombre de fois ou il est mentionné comme étant « interdit ». Les matériaux interdits et reconnus comme tel par la majorité des participants, sont les déchets de bâtiments suivis des boues papetière. Ces choix s'avèrent cohérents avec les activités précédentes, ces deux matériaux étant évalués de manière négative à chaque fois et quasiment jamais utilisés dans les mélanges. Les boues de STEP et les déchets de rue sont ensuite les moins acceptés. Cela est également cohérent avec les évaluations relatives au nom puis aux évaluations globales (nom + visuel).
Les terres excavées, le béton et les déchets verts ont été cités. Ceci est relativement surprenant car les évaluations des terres et du béton étaient plutôt neutre et très positive pour les déchets verts. Il semblerait que par rapport à ce classement l'influence des noms reprennent le dessus ; « déblais, acide, excavée » pour la terre, et « déchet » pour déchet vert. Le compost est positivement évalué ; le ballast et la brique, de manière neutre dans les étapes précédentes, ne sont jamais mentionnés. Ce constat est cohérent avec le reste des évaluations et rend ces matériaux unanimement utilisables.

Synthèse: des étapes d'évaluation et d'analyse pour une note autour de l'acceptabilité

Une synthèse reprenant l'ensemble des étapes permet d'illustrer les différents degrés d'acceptabilité des matériaux et souligne la façon dont ces enseignements ont été utilisés pour attribuer une note globale à l'acceptabilité. Cette note est valorisée est reprise dans l'outil multicritères.

	Visuel	Nom	Visuel + nom	reconnaissance (%)	Cités pour mélange	Utilisés pour mélange consensuel	Interdis	Note globale (linéaire)
DV	4,6	4,5		39%	1,4	4	1	3
CO	3,2	4,2	4,6	37%	4,6	3	0	3
SP	-3,6	-1,9	-4,2	17%	0,6	1	4	0
DR	4,4	-6,8	0,5	19%	2,0	2	1	1
BE	0,0	-1,0	0,1	45%	6,8	2	0	2
BA	-2,8	-4,3	-2,8	34%	2,0	4	0	1
BS	0,4	-6,2	-5,0	2%	1,8	1	2	0
TA	3,1	-1,0	1,8	40%	1,6		1	1
BR	4,4	0,2	4,1	98%	2,2	3	0	3
DB	-0,8	-5,5	-4,1	44%	1,0		4	0

Figure 134 : Synthèse des différentes étapes d'analyse et note globale (de 0 à 3)

La notation des mélanges est fortement influencée par l'aspect visuel du mélange. En revanche à l'échelle de chaque matériau, l'acceptabilité est influencée par la connaissance ou le préjugé intellectuel du matériau. En ce sens, c'est ce qui se dégage des mots, qui prime. Ainsi, le rapport au mot s'avère très important. Le grand public est hétérogène face à la sémantique et n'associe pas les mêmes choses selon la consonance de certains mots. Des efforts de communication, d'information et d'explication autour des matériaux, de leurs origines et des impacts qu'ils véhiculent semblent des éléments déterminants dans l'acceptabilité en vue de l'utilisation de certains matériaux.
Des plaquettes d'information, expliquant ce que sont intrinsèquement les matériaux, leur origine, leur composition et ce qu'ils génèrent peuvent par exemple être des leviers d'acceptabilité importants. Quelques exemples de matériaux peu connus ou à forte valeur de préjugé (boues, terres acides, déchets de rue, etc.).

VII.3.e. Préconisations et conditions pour l'utilisation des sols construits en ville

Il a été demandé aux participants de s'exprimer sur leurs attentes vis-à-vis de l'utilisation de ces technosols dans les espaces verts qu'ils connaissent. La question n'a pas été plus élaborée, pour voir si spontanément les participants énoncent des besoins ou attentes particulières. Spontanément les participants n'avaient pas d'attentes et il a fallu illustrer les types d'attentes potentielles pour démarrer une discussion : « Avez-vous des attentes en termes d'information, de sécurité etc.? ».
Une fois les participants orientés, les besoins ont été exprimés plus précisément. Cet exercice permet d'identifier certaines « conditions » en vue de l'utilisation des mélanges :

- Il semble important que **les matériaux utilisés soient locaux**, cela illustrerait l'effort de la collectivité en termes de recyclage et influencerait les citoyens à en faire autant à leur échelle. Pas question en revanche de recevoir les déchets d'une autre collectivité
- Les quantités de matières utilisées devraient être indiquées (sur des panneaux) cela sensibiliserait le grand public.
- Des **tests doivent être réalisés au préalable** et la sécurité assurée avant tout usages (impacts sur la santé). Les participants ont, à trois reprises, mentionné le principe de précaution et ont fait référence aux inquiétudes sur le niveau de doutes qui accompagnent certains matériaux (surtout par rapport aux boues).
- **La notion de sécurité est une condition préalable nécessaire à l'usage de mélanges et mise en place de sols construits en ville.**

Globalement, ces réactions indiquent que l'utilisation des matériaux sera acceptée si elle est ancrée dans une démarche de réutilisation et de valorisation de déchet d'origine locale. Dans le cas contraire, la réutilisation des déchets pourrait ne pas être acceptée. Par ailleurs, l'information et la sécurité vis-à-vis de la non-toxicité des matériaux sont des conditions globalement préalables et nécessaires à leur usage dans les espaces verts.

VII.4. Evaluation sanitaire et environnementale

Conformément à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, l'approche proposée ci-dessous est basée selon deux axes complémentaires et indissociables :

- Une démarche de comparaison avec valeurs réglementaires, valeurs de référence ou avec les fonds géochimiques et hydrogéochimiques locaux ;
- Une démarche d'Évaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS).

VII.4.a. Bases de données pour la définition de référentiels de qualité des sols et eaux souterraines (fonds géochimiques et hydrogéochimiques nationaux et locaux)

Il n'existe pas de référentiel unique de caractérisation de la qualité des sols. Par contre, différents projets ou programmes de recherches ont été menés ces vingt dernières années, et peuvent fournir des éléments nécessaires à l'établissement d'un tel référentiel. Les principaux projets ou programme de recherches menés dans le domaine de la caractérisation de la qualité des sols sont les suivants :
A noter que certains de ces référentiels ont pu être évoqués précédemment dans ce rapport, au côté et à titre de comparaison, de l'énoncé de résultats d'analyses individuelles de matériaux ou de mélanges (par ex. ASPITET, RMQS). Se référer directement aux parties 2 et 3 de ce rapport, pour prendre connaissance des résultats d'analyses et comparaison avec certaines valeurs de références proposées en hypothèses d'utilisation.

- programme INRA – ASPITET : ce programme de recherche intitulé « apports d'une stratification pédologique pour l'interprétation des Teneurs en Eléments Traces » avait pour objectif principal d'acquérir des références sur les concentrations en éléments traces dans les sols. Ce travail a pris en compte différents types de sols et les matériaux géologiques parentaux. L'ensemble des horizons constituant les sols ont été analysés, et pas seulement la couche de surface ;
- référentiel pédo-géochimique en région Nord-Pas de Calais (RPG-NPC) : ce référentiel, réalisé par l'INRA associé à l'Institut Supérieur d'Agronomie de Lille, s'appuie sur la réalisation et la description de 267 fosses pédologiques, ainsi que sur l'analyse de 768 échantillons. Il fournit les caractéristiques physico-chimiques et les teneurs en éléments traces (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) des principaux types de sol de la région. Il s'agit d'un outil de

gestion qui permet i) de déterminer les « valeurs normales agricoles » des horizons de surface des terres agricoles et ii) de juger du niveau de contamination d'un prélèvement ;

- collecte INRA/ADEME (ANADEME) : il s'agit d'une valorisation des très nombreuses analyses de « métaux lourds » réalisées à l'occasion des plans d'épandage de boues de stations d'épuration. En dépit de l'hétérogénéité des résultats collectés (multiplicité des laboratoires et des méthodes analytiques, protocoles et méthodologie d'échantillonnage variables), le traitement des 11 000 analyses permet de se faire une bonne idée de la qualité générale des sols agricoles et d'identifier des anomalies naturelles, ainsi que des zones de contaminations diffuses ou de pollutions localisées ;
- réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) : ce réseau est organisé selon une maille carrée de 16 km de côté, déterminant 2000 points (au centre de la maille) qui sont échantillonnés tous les 7 ans, depuis 2002. La première campagne de prélèvements s'est achevée fin 2008. Il doit permettre d'avoir une vision globale de la qualité des sols au niveau national, et d'identifier/caractériser leurs évolutions. Sur la base de la maille du RMQS, l'INRA et l'IFEN ont élaboré des indicateurs environnementaux et mis au point la base de données d'indicateurs de la qualité des sols. Les indicateurs obtenus sont cartographiés sur l'ensemble du territoire français. Les cartes sont regroupées au sein d'une application interactive : programme INDIQUASOL.

Les principales caractéristiques des bases de données relatives aux teneurs en ETM dans les sols sont regroupées dans le Tableau 60.

Tableau 79 : Principales caractéristiques des bases de données relatives aux teneurs en éléments traces métalliques dans les sols

	ASPITET	ANADEME	RPG-NPC	RMQS
Nombre de sites	1200	11 161	267	2200
localisation	Moitié nord de la France	France entière	Nord + Pas de Calais	France entière
Milieu concerné	Agriculture et forêt	agriculture	Agriculture et forêt	agriculture
Critères de sélection des sites	Raisons diverses	Plans d'épandage de boues d'épuration	Régions naturelles, types de sol, matériaux parentaux	Mailles d'une grille 16 x16 km
ETM analysés	As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Tl, Zn,	Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, PB, Se, Zn,	As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, In, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Tl, V, Zn	Cd, Cr, Co, Cu, Ni, Pb, Tl, Zn
Eléments majeurs analysés	Fe, Mn	aucun	Al, Fe, Mn	Al, Ca, FE, K, Mg, Mn, Ca
Méthodes d'échantillonnage	Par horizons	Horizon labouré	Par horizons	Horizon labouré + horizon semi-profond (30-50 cm)

En complément de ces bases de données spécifiques sur les sols, il existe une base de données sur les teneurs en éléments traces métalliques de plantes potagères (BAPPET), élaborée par l'ADEME / Inéris / ISA /CNAM, qui contient également des informations sur la pollution du sol où ces plantes potagères sont cultivées. Les paramètres suivants du sol sont pris en compte : pH, teneur en matière organique, texture (teneurs en argile, en sable, en limon), type de sol, mode d'extraction des ETM (extraction totale, semi-totale, partielle), éléments traces métalliques (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, TI, Zn). L'intérêt de cette base de données est qu'elle est alimentée par trois sources documentaires :

- des articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture,
- des rapports expérimentaux d'organismes de recherches et de chambres d'agriculture,
- des diagnostics environnementaux liés notamment aux sites industriels en activité ou non.

Cette diversité d'origine des informations permet de diversifier les contextes (industriels, urbains ou ruraux) et les sources de pollution (industrielle, agricole, urbaine, artificielle ou naturelle) pris en compte, et d'appréhender les transferts entre sols et plantes. Cette base de données a été initiée en 2007. La phase documentaire a bénéficié des contributions d'organismes publics de recherche, mais ensuite elle doit être enrichie par des données provenant de diagnostics environnementaux réalisés sur des sites industriels par des bureaux d'études.

Dans le cadre de l'inventaire minier du territoire national, le BRGM a effectué de nombreuses campagnes de prospection géochimique entre les années 1975 et 1991. Ces campagnes de prospection ont concerné les vieux socles hercyniens et alpins, ainsi que leurs marges sédimentaires, soit plus de 20% du territoire national. Le but de ce travail était de déceler des minéralisations dans l'environnement des sites d'échantillonnage. La procédure suivante a été utilisée :

- densité d'échantillonnage de l'ordre de 2 à 3 par km²,
- quantité de matériel brut : 1 à 3 kg de la partie fine superficielle,
- taille granulométrique analysée : 0-125 µm (argiles, limons et silts fins).

Enfin, le FOREGS (Forum of the European Geological Surveys, remplacé depuis 2005 par l'EuroGeoSurveys) a réalisé un programme de cartographie de références géochimiques à l'échelle européenne (Geochemical Baseline Mapping Programme). Les résultats de ce programme sont actuellement disponibles depuis le site du GTK (Geological Survey de Finlande) sous le nom d'Atlas Géochimique de l'Europe. Les informations contenues ne sont pas présentées sous la forme d'une base de données mais sous la forme de cartes de concentration d'une large gamme d'éléments chimiques et d'indicateurs physico-chimiques.

VII.4.b. Evaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS) sur les mélanges SITERRE

Principes et hypothèses de départ

Les évaluations des risques sanitaires ont pour but de calculer les Concentrations Maximales Admissibles (CMA), valeurs au-dessous desquelles les polluants ne génèrent pas de risques inacceptables pour l'homme.

Ces évaluations des risques sanitaires se basent sur la toxicité des polluants, les expositions des personnes et les doses de polluants ingérées.

Dans notre cas d'étude, seuls les risques par ingestion ont été pris en compte (risque le plus majorant).

L'évaluation porte sur les 5 mélanges suivants tels selon les formulations énoncées dans la tâche 3 :

- TA/CO : terre acide, compost
- BR/CO : brique, compost
- BA/DR/CO : ballast, déchets de balayage de rues, compost
- TA/BA/BS : terre acide, ballast, boues de step
- TA/BE/DV : terre acide, béton, déchets vers bruts broyés

Evaluation de la toxicité

Les principes de sélection des Valeurs Toxicologiques de Références (VTR) suivants ont été retenus :

1. Recensement des VTR disponibles parmi les valeurs produites par les organismes suivants : US-EPA, OMS, ATSDR, RIVM, Sante Canada, OEHHA ;
2. Analyse succincte de la pertinence des valeurs disponibles et exclusion des valeurs reconnues de manière évidente comme étant de qualité médiocre ;
3. Sélection des VTR les plus protectrices parmi l'ensemble des valeurs pertinentes disponibles.

Le Tableau 61 présente de manière synthétique les VTR retenues dans la présente étude.

La revue toxicologique a été effectuée en novembre 2012.

Tableau 80 : Choix des Valeurs Toxicologiques de Références

		VTR à seuil												Classif canécogénicité			VTR sans seuil																			
N° CAS	Substance	US-EPA		ATSDR		OMS		Sté Canada		RIVM		OEHHA		VTR retenue			US-EPA		OMS		RIVM		Sté Canada		OEHHA		Application des FET		VTR retenue							
		mg/kg/j	date	mg/kg/j	date	mg/kg/j	date	mg/kg/j	date	mg/kg/j	date	mg/kg/j	date	mg/kg/j	source	US EPA	CIRC	UE	par mg/kg/j	date	par mg/kg/j	date	par mg/kg/j	date	par mg/kg/j	date	par mg/kg/j	date	par mg/kg/j	source	par mg/kg/j	source				
7440360	Sb	4,00E-04	1991											4,0E-04	US-EPA, 1991	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-							
7440393	Ba	0,2	2005											2,0E-01	US-EPA, 2005	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-							
7439987	Mo	5,00E-03	1993											5,0E-03	US-EPA, 1993	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-							
7440315	Sn	-	-	0,3 (int)	2005	-	-	-	-	-	-			-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-					
7782492	Se	5,00E-03	1991											5,0E-03	US-EPA, 1991	D	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-							
7439921	Pb	-	2004	-	-	0,0035 (prov)	2003	-	-	3,60E-03	2001			3,6E-03	RIVM, 2001	B2	2B	-	-	-	-	-	-	-	-	8,50E-03	2002			8,5E-03	OEHHA, 2008						
7440666	Zn	0,3	2005											3,0E-01	US-EPA, 2005	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-							
18540299	Cr (+VI)	3,00E-03	1998											3,0E-03	US-EPA, 1998	D (voie orale) A (inhalation)	1	1B	-	-	-	-	-	-	-	-	4,20E-01	2002			4,2E-01	OEHHA, 2002						
16065831	Cr (+III)	1,5	1998											1,5E+00	US-EPA, 1998	D	3	1B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-							
7440508	Cu	-	-	0,01 (int)	2004	0,5 (prov)	1996	-	-	0,14	2001			1,4E-01	RIVM, 2001	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-							
7440439	Cd	5,00E-04	1994											5,0E-04	US-EPA, 1994	B1	1	1B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-							
7440382	As	3,00E-04	1993											3,0E-04	US-EPA, 1993	A	1	-	1,5	1998											1,5E+00	US-EPA, 1998						
7439976	Hg inorganique/élémentaire	3,00E-04	1995	2e-3 (int)	1999	0,00071 (prov)	2003	-	-	2,00E-03	2001			3,0E-04	US-EPA, 1995	D (élémentaire) C (chlorure de mercure)	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-							
115093 22967926	Hg organique	1,00E-04	2001											1,0E-04	US-EPA, 2001	C	2B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-							
7440020	Ni	2,00E-02	1996											2,0E-02	US-EPA, 1996	-	2B	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-							
208968	Acénaphtylène	-	-	-	-	-	-							-		D	-	-	-	-	-	-	2,00E-03	2001	-	-			2,00E-04		2,0E-04	RIVM, 2001 FET INERIS, 2006				
83329	Acénaphtène	0,06	1994											6,0E-02	US-EPA, 1994	-	3	-	-	-	-	-	2,00E-04	2001	-	-			2,00E-04		2,0E-04					
120127	Anthracène	0,3	1993											3,0E-01	US-EPA, 1993	D	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			2,0E-03						
56553	Benzo (a) anthracène	-	-	-	-	-	-							-		B2	2B	1B	-	-	-	-	2,00E-02	2001	-	-	1,2	2005	2,00E-02		2,0E-02					
50328	Benzo (a) pyrène	-	-	-	-	-	-							-		B2	1	1B	7,3	1994	-	-	2,00E-01	2001	-	-	12	2005	2,00E-01		2,0E-01	RIVM, 2001				
205992	Benzo (b) fluoranthène	-	-	-	-	-	-							-		B2	2B	1B	-	-	-	-	2,00E-02	2001	-	-	1,2	2005	2,00E-02	VTR RIVM pour le B[a]P * FET INERIS (2006)	2,0E-02	RIVM, 2001 FET INERIS, 2006				
191242	Benzo (ghi) pérylène	-	-	-	-	-	-			3,00E-02	2001			3,0E-02	RIVM, 2001	D	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			2,0E-03						
207089	Benzo (k) fluoranthène	-	-	-	-	-	-							-		B2	2B	1B	-	-	-	-	2,00E-02	2001	-	-			2,00E-02		2,0E-02					
218019	Chrysène	-	-	-	-	-	-							-		B2	2B	1B	-	-	-	-	2,00E-03	2001	-	-			2,00E-03		2,0E-03					
53703	Dibenzo (ah) anthracène	-	-	-	-	-	-							-		B2	2A	1B	-	-	-	-	2,00E-01	2001	-	-			2,00E-01		2,0E-01					
206440	Fluoranthène	0,04	1993											4,0E-02	US-EPA, 1993	D	3	-	-	-	-	-	2,00E-03	2001	-	-			2,00E-04		2,0E-04					
86737	Fluorène	0,04	1990											4,0E-02	US-EPA, 1990	D	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			2,00E-04		2,0E-04					
193395	Indéno pyrène	-	-	-	-	-	-							-		B2	2B	-	-	-	-	-	2,00E-02	2001	-	-			2,00E-02		2,0E-02					
91203	Naphtalène	0,02	1998											2,0E-02	US-EPA, 1998	C	2B	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			2,00E-04		2,0E-04					
85018	Phénanthrène	-	-	-	-	-	-			4,00E-02	2001			4,0E-02	RIVM, 2001	D	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			2,00E-04		2,0E-04					
129000	Pyrène	3,00E-02	1993											3,0E-02	US-EPA, 1993	D	3	-	-	-	-	-	2,00E-04	2001	-	-			2,00E-04		2,0E-04					
1336363	PCB	2,00E-05	1996											2,0E-05	US-EPA, 1996	B2	2A	-	2	1997											2,0E+00	US-EPA, 1997				
	Congénère 28																																		
	Congénère 52																																		
	Congénère 101																																		
	Congénère 118																																		
	Congénère 138																																		
	Congénère 153																																		
	Congénère 180																																		

Abréviations :

RIVM : RijksInstituut voor Volksgezondheid en Milieu (Institut néerlandais de la santé publique et de l'environnement) ; US EPA (IRIS) : United-States environmental protection agency (agence américaine de protection de l'environnement) - integrated risk information system ; OEHHA : Office of Environmental Health Hazard Assessment (bureau de l'état de Californie pour l'évaluation des risques sanitaires liés à l'environnement) ; ATSDR : Agency for toxic substances and disease registry (Agence pour le registre des substances toxiques et maladies aux Etats-Unis) ; TPHCWG : Total petroleum hydrocarbon criteria working group ; OMS : Organisation Mondiale de la Santé ; FET : Facteur d'Equivalence Toxique

Scénarios pris en compte et Evaluation des expositions

Les scénarios pris en compte pour ces calculs de risques sanitaires sont les suivants :

- Square :
  - Promeneurs adultes,
  - Promeneurs enfants,
  - Chargé d'entretien,
- Alignement
  - Promeneurs adultes,
  - Promeneurs enfants,
  - Chargé d'entretien.

Chacun des scénarios présente des hypothèses d'ingestion et de doses associées différentes dépendamment du temps de présence, des doses journalières ingérées mais aussi de l'âge des cibles.

Les paramètres généraux caractérisant l'exposition des différentes cibles sont renseignés dans le Tableau 62.

Tableau 81 : Choix des paramètres d'exposition

Scénario square				
Promeneur adulte	Masse de sol ingéré par jour (Q sol)	5,00E-05	kg/j	US-EPA (1997) ; Calabrese (2003) 75ème percentile
	Nombre de jours d'exposition (NbJ)	365	j	Bonnard et al (2001)
	Durée d'exposition (DE)	30	an	Bonnard et al (2001)
	Poids corporel	62,5	kg	ADEME, IRSN (2003)
Promeneur enfant	Masse de sol ingéré par jour (Q sol)	9,10E-05	kg/j	Dor et al. (2009), Stanek et al. (2001) 95ème percentile
	Nombre de jours d'exposition (NbJ)	365	j	Bonnard et al (2001)
	Durée d'exposition (DE)	6	an	Bonnard et al (2001)
	Poids corporel	13	kg	INERIS (2008)
Chargé d'entretien	Masse de sol ingéré par jour (Q sol)	1,00E-04	kg/j	Stanek (1997) ; US-EPA (1997) Valeur moyenne US-EPA, June 6th 2003. Human Health Risk Assessment GE/HOUSATONIC River Site Rest of River ; Volume IIIA, Appendix B : Phase II Direct Contact Risk Assessment Text and Tables
	Nombre de jours d'exposition par an (NbJ)	47	j	Avis d'expert 1 j/semaine pendant 47 semaines/an A valider par partenaires
	Durée d'exposition (DE)	40	an	Bonnard et al (2001)
	Poids corporel	62,5	kg	ADEME, IRSN (2003)
Scénario alignement d'arbres				
Promeneur adulte	Masse de sol ingéré par jour (Q sol)	1,00E-05	kg/j	Stanek et al. (1997) Valeur moyenne
	Nombre de jours d'exposition (NbJ)	365	j	Bonnard et al (2001)
	Durée d'exposition (DE)	30	an	Bonnard et al (2001)
	Poids corporel	62,5	kg	ADEME, IRSN (2003)
Promeneur enfant	Masse de sol ingéré par jour (Q sol)	2,40E-05	kg/j	Dor et al. (2009), Stanek et al. (2001) Valeur médiane
	Nombre de jours d'exposition (NbJ)	365	j	Bonnard et al (2001)
	Durée d'exposition (DE)	6	an	Bonnard et al (2001)
	Poids corporel	13	kg	INERIS (2008)
Chargé d'entretien	Masse de sol ingéré par jour (Q sol)	1,00E-04	kg/j	Stanek (1997) ; US-EPA (1997) Valeur moyenne US-EPA, June 6th 2003. Human Health Risk Assessment GE/HOUSATONIC River Site Rest of River ; Volume IIIA, Appendix B : Phase II Direct Contact Risk Assessment Text and Tables
	Nombre de jours d'exposition (NbJ)	47	j	Avis d'expert 1 j/semaine pendant 47 semaines/an A valider par partenaires
	Durée d'exposition (DE)	40	an	Bonnard et al (2001)
	Poids corporel	62,5	kg	ADEME, IRSN (2003)

Concentrations prises en compte

Les concentrations prises en compte pour les Evaluations de Risques Sanitaires sont présentées dans le Tableau 63.

Tableau 82 : Concentrations en polluants dans les matériaux d'apport

n° CAS	Eléments	TA/CO mg/kg	BR/CO mg/kg	BA/DR/CO mg/kg	TA/BA/BS mg/kg	TA/BE/DV mg/kg
7440360	Sb	3,9	7	15	4,2	2,1
7440393	Ba	475	327	288	339	503
7439987	Mo	1,4	4,2	3,7	2,3	0,9
7440315	Sn					
7782492	Se	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
7439921	Pb	24	46	40	18	20
7440666	Zn	112	319	257	119	59
18540299	Cr (+VI)	48	40	56	79	40
16065831	Cr (+III)	48	40	56	79	40
7440508	Cu	44	134	124	63	35
7440439	Cd	0,2	0,5	0,3	0,2	0,05
7440382	As	15	25	15	15	12
7439976	Hg inorganique/élémentaire					
115093	Hg organique					
22967926						
7440020	Ni	17	19	24	26	18
208968	Acénaphtylène	1,12E-01	1,74E-01	1,24E-01	5,00E-02	5,21E-02
83329	Acénaphtène	5,00E-03	5,00E-03	2,96E-02	6,61E-02	1,57E-02
120127	Anthracène	7,25E-03	9,50E-03	5,90E-02	1,32E-01	3,52E-02
56553	Benzo (a) anthracène	3,85E-02	5,20E-02	4,32E-01	9,90E-01	1,11E-01
50328	Benzo (a) pyrène	3,33E-02	6,15E-02	3,55E-01	7,57E-01	1,51E-01
205992	Benzo (b) fluoranthène	5,63E-02	8,75E-02	8,25E-01	1,86E+00	1,96E-01
191242	Benzo (ghi) pérylène	3,08E-02	5,65E-02	2,05E-01	3,95E-01	1,13E-01
207089	Benzo (k) floranthène	2,05E-02	3,60E-02	3,61E-01	8,16E-01	8,55E-02
218019	Chrysène	2,78E-02	5,05E-02	6,76E-01	1,54E+00	1,05E-01
53703	Dibenzo (ah) anthracène	7,00E-03	9,00E-03	2,75E-02	5,46E-02	1,19E-02
206440	Fluoranthène	7,28E-02	9,55E-02	1,77E+00	4,15E+00	2,35E-01
86737	Fluorène	3,13E-02	5,75E-02	7,19E-02	8,64E-02	2,81E-02
193395	Indéno pyrène	3,00E-02	5,50E-02	2,43E-01	5,14E-01	1,00E-01
91203	Naphtalène	9,25E-03	1,35E-02	8,66E-02	1,94E-01	2,26E-02
85018	Phénanthrène	3,83E-02	7,15E-02	4,54E-01	9,54E-01	1,68E-01
129000	Pyrène	6,58E-02	8,15E-02	1,29E+00	3,07E+00	2,44E-01
1336363	PCB	4,90E-02	4,90E-02	5,53E-02	6,45E-02	4,90E-02

Il faut noter que le mercure n'a pas été analysé dans les matériaux d'apport. Il n'a, de ce fait, pas été pris en compte dans la suite des évaluations des risques sanitaires.

De plus, les Hydrocarbures Aliphatiques et Aromatiques analysés par fraction n'ont pas été pris en compte du fait de la non-disponibilité des types de fraction. Cet élément n'est pas primordial pour les évaluations des risques sanitaires étant donné le fait que les HAP pris par composés unitaires sont plus pénalisants en terme sanitaires que les Hydrocarbures Aliphatiques et Aromatiques par fraction.

Pour les composés organiques, il n'y a pas eu d'analyse détaillée sur les mélanges, les concentrations de départ sont donc le fruit d'une pondération des pourcentages massiques de chacun des matériaux élémentaires (avant mélange).

Détermination des Doses Journalières d'expositions

Pour la voie d'exposition par ingestion, le calcul des DJE est basé sur les concentrations en polluants dans les sols et sur les scenarii de consommation alimentaire ainsi que le poids corporel des cibles.

Il s'exprime par la relation suivante :

$$DJEij = \frac{CiQijTF}{PTm}$$

où :
DJE : la dose journalière d'exposition liée à une exposition au milieu i par la voie j (mg/kg/j) ;

Ci : la concentration d'exposition au milieu i (sol, eau souterraine, aliments, etc.) (mg/kg, mg/m^3 ou mg/l) ;
Qij : la quantité de milieu i administrée par la voie j par jour (kg/j pour les milieux solides et m^3/j ou l/j pour les gaz ou liquides) ;
T : Durée d'exposition (années) ;
Tm : la période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée (années) ;
F : Fréquence d'exposition (nombre de jours d'exposition par an) ;
P : poids corporel de la cible (kg).

Calculs de risques sanitaires

Les calculs de risques sanitaires sont réalisés différemment selon que les polluants sont cancérigènes ou non.

Substances non cancérigènes : substances à seuils
Pour les effets à seuils, la possibilité de survenue d'un effet toxique chez la cible est représentée par un Quotient de Danger.

QD = DJE/VTR

Lorsque cet indice est inférieur à 1, la survenue d'un effet toxique apparaît peu probable, même pour les populations sensibles. Au-delà de 1, la possibilité d'apparition d'un effet toxique ne peut plus être exclue. Pour le cas d'étude, il a été choisi d'être sécuritaire conformément à la note ministérielle de gestion des sites et sols pollués (08 février 2007). Le seuil QD est donc de 0,2 en première approche.

Substances cancérigènes : substances sans seuils
Pour les substances sans seuils, un excès de risque individuel (ERI) est calculé en multipliant la DJE par l'excès de risque unitaire par ingestion (ERUI).

ERI = DJE x ERUi

L'ERI représente la probabilité qu'un individu a de développer l'effet associé à la substance pendant sa vie du fait de l'exposition considérée.

L'excès de risque de cancer admis est de 10^{-5} et l'indice de risque est obtenu selon ERI/10^{-5}. Il ne doit pas être supérieur à 1. Pour le cas d'étude, il a été choisi d'être sécuritaire conformément à la note ministérielle de gestion des sites et sols pollués (08 février 2007). Le seuil ERI est donc de 10^{-6} en première approche.

Additivité des risques

Les risques sont d'abord calculés substance par substance. L'exposition à un mélange de plusieurs substances peut induire l'additivité, la synergie (amplification des effets) ou l'antagonisme (annulation des effets). En l'absence de connaissances sur les phénomènes de synergie et d'antagonisme entre les substances, l'additivité des risques liés à l'exposition à plusieurs substances a été retenue :

- **Pour les effets à seuils**, l'additivité des quotients de danger entre voies d'exposition et substances est retenue comme hypothèse de départ, quel que soit les effets sanitaires associés à chacune des substances considérées.

Une approche plus fine aurait consisté à ne sommer que les risques associés à des substances ou des voies d'exposition pour lesquelles des effets critiques communs existent. Une telle approche n'a pas été mise en œuvre car certains polluants ont des effets sanitaires communs notamment sur le système nerveux, le foie et le rein.

- **Pour les effets sans seuils** (cancérigènes génotoxiques), le cumul des excès de risques individuels correspond à l'hypothèse d'une indépendance des effets cancérigènes des différentes substances.

Résultats du scenario square

Les tableaux suivants présentent les choix des paramètres d'exposition et les valeurs limites calculées dans les sols pour les effets à seuils et les effets sans seuils.

Tableau 83 : Scénario square - Promeneurs adultes - Choix des paramètres d'exposition et valeurs limites calculées dans les sols pour les effets à seuils et les effets sans seuils

Square

Promeneur adulte

n° CAS	Eléments	QD max	ERI max	Q sol	NbJ	DE	Poids	VTR à seuil	VTR sans seuil	Teneur maximale dans le sol - effets à seuil	Teneur maximale dans le sol - effets sans seuil	Teneur maximale dans le sol - tout effet
		-	-	kg/j	j	an	kg	mg/kg/j	(mg/kg/j)-1	mg/kg	mg/kg	mg/kg
7440360	Sb	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	4,0E-04	-	1,00E+02	-	1,00E+02
7440393	Ba	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	2,0E-01	-	5,00E+04	-	5,00E+04
7439987	Mo	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	5,0E-03	-	1,25E+03	-	1,25E+03
7440315	Sn	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	-	-	-	-	-
7782492	Se	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	5,0E-03	-	1,25E+03	-	1,25E+03
7439921	Pb	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	3,6E-03	8,5E-03	9,00E+02	3,43E+02	3,43E+02
7440666	Zn	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	3,0E-01	-	7,50E+04	-	7,50E+04
18540299	Cr (+VI)	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	3,0E-03	4,2E-01	7,50E+02	6,94E+00	6,94E+00
16065831	Cr (+III)	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	1,5E+00	-	3,75E+05	-	3,75E+05
7440508	Cu	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	1,4E-01	-	3,50E+04	-	3,50E+04
7440439	Cd	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	5,0E-04	-	1,25E+02	-	1,25E+02
7440382	As	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	3,0E-04	1,5E+00	7,50E+01	1,94E+00	1,94E+00
7439976	Hg inorganique/élémentaire	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	3,0E-04	-	7,50E+01	-	7,50E+01
115093 22967926	Hg organique	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	1,0E-04	-	2,50E+01	-	2,50E+01
7440020	Ni	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	2,0E-02	-	5,00E+03	-	5,00E+03
208968	Acénaphtylène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-04	-	1,46E+04	1,46E+04
83329	Acénaphtène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	6,0E-02	2,0E-04	1,50E+04	1,46E+04	1,46E+04
120127	Anthracène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	3,0E-01	2,0E-03	7,50E+04	1,46E+03	1,46E+03
56553	Benzo (a) anthracène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-02	-	1,46E+02	1,46E+02
50328	Benzo (a) pyrène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-01	-	1,46E+01	1,46E+01
205992	Benzo (b) fluoranthène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-02	-	1,46E+02	1,46E+02
191242	Benzo (ghi) pérylène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	3,0E-02	2,0E-03	7,50E+03	1,46E+03	1,46E+03
207089	Benzo (k) floranthène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-02	-	1,46E+02	1,46E+02
218019	Chrysène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-03	-	1,46E+03	1,46E+03
53703	Dibenzo (ah) anthracène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-01	-	1,46E+01	1,46E+01
206440	Fluoranthène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	4,0E-02	2,0E-04	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04
86737	Fluorène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	4,0E-02	2,0E-04	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04
193395	Indéno pyrène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-02	-	1,46E+02	1,46E+02
91203	Naphtalène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	2,0E-02	2,0E-04	5,00E+03	1,46E+04	5,00E+03
85018	Phénanthrène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	4,0E-02	2,0E-04	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04
129000	Pyrène	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	3,0E-02	2,0E-04	7,50E+03	1,46E+04	7,50E+03
1336363	PCB	0,2	1,00E-06	5,00E-05	365	30	62,5	2,0E-05	2,0E+00	5,00E+00	1,46E+00	1,46E+00

Tableau 84 : Scénario square – Promeneurs enfants - Choix des paramètres d'exposition et valeurs limites calculées dans les sols pour les effets à seuils et les effets sans seuils

Square

Promeneur enfant

n° CAS	Eléments	QD max	ERI max	Q sol	NbJ	DE	Poids	VTR à seuil	VTR sans seuil	Teneur maximale dans le sol - effets à seuil	Teneur maximale dans le sol - effets sans seuil	Teneur maximale dans le sol - tout effet
		-	-	kg/j	j	an	kg	mg/kg/j	(mg/kg/j)-1	mg/kg	mg/kg	mg/kg
7440360	Sb	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	4,0E-04	-	1,14E+01	-	1,14E+01
7440393	Ba	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	2,0E-01	-	5,71E+03	-	5,71E+03
7439987	Mo	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	5,0E-03	-	1,43E+02	-	1,43E+02
7440315	Sn	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	-	-	-	-	-
7782492	Se	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	5,0E-03	-	1,43E+02	-	1,43E+02
7439921	Pb	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	3,6E-03	8,5E-03	1,03E+02	1,96E+02	1,03E+02
7440666	Zn	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	3,0E-01	-	8,57E+03	-	8,57E+03
18540299	Cr (+VI)	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	3,0E-03	4,2E-01	8,57E+01	3,97E+00	3,97E+00
16065831	Cr (+III)	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	1,5E+00	-	4,29E+04	-	4,29E+04
7440508	Cu	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	1,4E-01	-	4,00E+03	-	4,00E+03
7440439	Cd	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	5,0E-04	-	1,43E+01	-	1,43E+01
7440382	As	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	3,0E-04	1,5E+00	8,57E+00	1,11E+00	1,11E+00
7439976	Hg inorganique/élémentaire	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	3,0E-04	-	8,57E+00	-	8,57E+00
115093 22967926	Hg organique	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	1,0E-04	-	2,86E+00	-	2,86E+00
7440020	Ni	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	2,0E-02	-	5,71E+02	-	5,71E+02
208968	Acénaphtylène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	-	2,0E-04	-	8,33E+03	8,33E+03
83329	Acénaphtène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	6,0E-02	2,0E-04	1,71E+03	8,33E+03	1,71E+03
120127	Anthracène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	3,0E-01	2,0E-03	8,57E+03	8,33E+02	8,33E+02
56553	Benzo (a) anthracène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	-	2,0E-02	-	8,33E+01	8,33E+01
50328	Benzo (a) pyrène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	-	2,0E-01	-	8,33E+00	8,33E+00
205992	Benzo (b) fluoranthène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	-	2,0E-02	-	8,33E+01	8,33E+01
191242	Benzo (ghi) pérylène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	3,0E-02	2,0E-03	8,57E+02	8,33E+02	8,33E+02
207089	Benzo (k) floranthène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	-	2,0E-02	-	8,33E+01	8,33E+01
218019	Chrysène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	-	2,0E-03	-	8,33E+02	8,33E+02
53703	Dibenzo (ah) anthracène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	-	2,0E-01	-	8,33E+00	8,33E+00
206440	Fluoranthène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	4,0E-02	2,0E-04	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03
86737	Fluorène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	4,0E-02	2,0E-04	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03
193395	Indéno pyrène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	-	2,0E-02	-	8,33E+01	8,33E+01
91203	Naphtalène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	2,0E-02	2,0E-04	5,71E+02	8,33E+03	5,71E+02
85018	Phénanthrène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	4,0E-02	2,0E-04	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03
129000	Pyrène	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	3,0E-02	2,0E-04	8,57E+02	8,33E+03	8,57E+02
1336363	PCB	0,2	1,00E-06	9,10E-05	365	6	13	2,0E-05	2,0E+00	5,71E-01	8,33E-01	5,71E-01

Tableau 85 : Scénario square – Chargé d'entretien - Choix des paramètres d'exposition et valeurs limites calculées dans les sols pour les effets à seuils et les effets sans seuils

Square

Chargé d'entretien

n° CAS	Eléments	QD max	ERI max	Q sol	NbJ	DE	Poids	VTR à seuil	VTR sans seuil	Teneur maximale dans le sol - effets à seuil	Teneur maximale dans le sol - effets sans seuil	Teneur maximale dans le sol - tout effet
		-	-	kg/j	j	an	kg	mg/kg/j	(mg/kg/j)-1	mg/kg	mg/kg	mg/kg
7440360	Sb	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	4,0E-04	-	3,88E+02	-	3,88E+02
7440393	Ba	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	2,0E-01	-	1,94E+05	-	1,94E+05
7439987	Mo	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	5,0E-03	-	4,85E+03	-	4,85E+03
7440315	Sn	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	-	-	-	-
7782492	Se	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	5,0E-03	-	4,85E+03	-	4,85E+03
7439921	Pb	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,6E-03	8,5E-03	3,49E+03	9,99E+02	9,99E+02
7440666	Zn	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,0E-01	-	2,91E+05	-	2,91E+05
18540299	Cr (+VI)	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,0E-03	4,2E-01	2,91E+03	2,02E+01	2,02E+01
16065831	Cr (+III)	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	1,5E+00	-	1,46E+06	-	1,46E+06
7440508	Cu	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	1,4E-01	-	1,36E+05	-	1,36E+05
7440439	Cd	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	5,0E-04	-	4,85E+02	-	4,85E+02
7440382	As	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,0E-04	1,5E+00	2,91E+02	5,66E+00	5,66E+00
7439976	Hg inorganique/élémentaire	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,0E-04	-	2,91E+02	-	2,91E+02
115093 22967926	Hg organique	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	1,0E-04	-	9,71E+01	-	9,71E+01
7440020	Ni	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	2,0E-02	-	1,94E+04	-	1,94E+04
208968	Acénaphtylène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-04	-	4,25E+04	4,25E+04
83329	Acénaphtène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	6,0E-02	2,0E-04	5,82E+04	4,25E+04	4,25E+04
120127	Anthracène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,0E-01	2,0E-03	2,91E+05	4,25E+03	4,25E+03
56553	Benzo (a) anthracène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-02	-	4,25E+02	4,25E+02
50328	Benzo (a) pyrène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-01	-	4,25E+01	4,25E+01
205992	Benzo (b) fluoranthène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-02	-	4,25E+02	4,25E+02
191242	Benzo (ghi) pérylène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,0E-02	2,0E-03	2,91E+04	4,25E+03	4,25E+03
207089	Benzo (k) floranthène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-02	-	4,25E+02	4,25E+02
218019	Chrysène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-03	-	4,25E+03	4,25E+03
53703	Dibenzo (ah) anthracène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-01	-	4,25E+01	4,25E+01
206440	Fluoranthène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	4,0E-02	2,0E-04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04
86737	Fluorène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	4,0E-02	2,0E-04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04
193395	Indéno pyrène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-02	-	4,25E+02	4,25E+02
91203	Naphtalène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	2,0E-02	2,0E-04	1,94E+04	4,25E+04	1,94E+04
85018	Phénanthrène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	4,0E-02	2,0E-04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04
129000	Pyrène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,0E-02	2,0E-04	2,91E+04	4,25E+04	2,91E+04
1336363	PCB	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	2,0E-05	2,0E+00	1,94E+01	4,25E+00	4,25E+00

Les tableaux suivants présentent les résultats des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges.

Tableau 86 : Scénario square – Promeneurs adultes – Calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Square

Promeneur adulte

		Echantillons TA/CO			Echantillons BR/CO			Echantillons BA/DR/CO			Echantillons TA/BA/BS			Echantillons TA/BE/DV		
n° CAS	Eléments	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé
		mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-
7440360	Sb	3,90E+00	7,80E-03	-	7,00E+00	1,40E-02	-	1,50E+01	3,00E-02	-	4,20E+00	8,40E-03	-	2,10E+00	4,20E-03	-
7440393	Ba	4,75E+02	1,90E-03	-	3,27E+02	1,31E-03	-	2,88E+02	1,15E-03	-	3,39E+02	1,36E-03	-	5,03E+02	2,01E-03	-
7439987	Mo	1,40E+00	2,24E-04	-	4,20E+00	6,72E-04	-	3,70E+00	5,92E-04	-	2,30E+00	3,68E-04	-	9,00E-01	1,44E-04	-
7440315	Sn	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-
7782492	Se	5,00E-01	8,00E-05	-	5,00E-01	8,00E-05	-	5,00E-01	8,00E-05	-	5,00E-01	8,00E-05	-	5,00E-01	8,00E-05	-
7439921	Pb	2,40E+01	5,33E-03	6,99E-08	4,60E+01	1,02E-02	1,34E-07	4,00E+01	8,89E-03	1,17E-07	1,80E+01	4,00E-03	5,25E-08	2,00E+01	4,44E-03	5,83E-08
7440666	Zn	1,12E+02	2,99E-04	-	3,19E+02	8,51E-04	-	2,57E+02	6,85E-04	-	1,19E+02	3,17E-04	-	5,90E+01	1,57E-04	-
18540299	Cr (+VI)	4,80E+01	1,28E-02	6,91E-06	4,00E+01	1,07E-02	5,76E-06	5,60E+01	1,49E-02	8,06E-06	7,90E+01	2,11E-02	1,14E-05	4,00E+01	1,07E-02	5,76E-06
16065831	Cr (+III)	4,80E+01	2,56E-05	-	4,00E+01	2,13E-05	-	5,60E+01	2,99E-05	-	7,90E+01	4,21E-05	-	4,00E+01	2,13E-05	-
7440508	Cu	4,40E+01	2,51E-04	-	1,34E+02	7,66E-04	-	1,24E+02	7,09E-04	-	6,30E+01	3,60E-04	-	3,50E+01	2,00E-04	-
7440439	Cd	2,00E-01	3,20E-04	-	5,00E-01	8,00E-04	-	3,00E-01	4,80E-04	-	2,00E-01	3,20E-04	-	5,00E-02	8,00E-05	-
7440382	As	1,50E+01	4,00E-02	7,71E-06	2,50E+01	6,67E-02	1,29E-05	1,50E+01	4,00E-02	7,71E-06	1,50E+01	4,00E-02	7,71E-06	1,20E+01	3,20E-02	6,17E-06
7439976	Hg inorganique/élémentaire	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
115093 22967926	Hg organique	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
7440020	Ni	1,70E+01	6,80E-04	-	1,90E+01	7,60E-04	-	2,40E+01	9,60E-04	-	2,60E+01	1,04E-03	-	1,80E+01	7,20E-04	-
208968	Acénaphtylène	1,12E-01	-	7,66E-12	1,74E-01	-	1,19E-11	1,24E-01	-	8,51E-12	5,00E-02	-	3,43E-12	5,21E-02	-	3,57E-12
83329	Acénaphtène	5,00E-03	6,67E-08	3,43E-13	5,00E-03	6,67E-08	3,43E-13	2,96E-02	3,95E-07	2,03E-12	6,61E-02	8,82E-07	4,53E-12	1,57E-02	2,09E-07	1,08E-12
120127	Anthracène	7,25E-03	1,93E-08	4,97E-12	9,50E-03	2,53E-08	6,51E-12	5,90E-02	1,57E-07	4,05E-11	1,32E-01	3,51E-07	9,02E-11	3,52E-02	9,40E-08	2,42E-11
56553	Benzo (a) anthracène	3,85E-02	-	2,64E-10	5,20E-02	-	3,57E-10	4,32E-01	-	2,97E-09	9,90E-01	-	6,79E-09	1,11E-01	-	7,64E-10
50328	Benzo (a) pyrène	3,33E-02	-	2,28E-09	6,15E-02	-	4,22E-09	3,55E-01	-	2,43E-08	7,57E-01	-	5,19E-08	1,51E-01	-	1,04E-08
205992	Benzo (b) fluoranthène	5,63E-02	-	3,86E-10	8,75E-02	-	6,00E-10	8,25E-01	-	5,66E-09	1,86E+00	-	1,28E-08	1,96E-01	-	1,34E-09
191242	Benzo (ghi) pérylène	3,08E-02	8,20E-07	2,11E-11	5,65E-02	1,51E-06	3,87E-11	2,05E-01	5,46E-06	1,40E-10	3,95E-01	1,05E-05	2,71E-10	1,13E-01	3,02E-06	7,76E-11
207089	Benzo (k) floranthène	2,05E-02	-	1,41E-10	3,60E-02	-	2,47E-10	3,61E-01	-	2,47E-09	8,16E-01	-	5,59E-09	8,55E-02	-	5,86E-10
218019	Chrysène	2,78E-02	-	1,90E-11	5,05E-02	-	3,46E-11	6,76E-01	-	4,64E-10	1,54E+00	-	1,05E-09	1,05E-01	-	7,22E-11
53703	Dibenzo (ah) anthracène	7,00E-03	-	4,80E-10	9,00E-03	-	6,17E-10	2,75E-02	-	1,89E-09	5,46E-02	-	3,74E-09	1,19E-02	-	8,18E-10
206440	Fluoranthène	7,28E-02	1,46E-06	4,99E-12	9,55E-02	1,91E-06	6,55E-12	1,77E+00	3,54E-05	1,21E-10	4,15E+00	8,31E-05	2,85E-10	2,35E-01	4,70E-06	1,61E-11
86737	Fluorène	3,13E-02	6,25E-07	2,14E-12	5,75E-02	1,15E-06	3,94E-12	7,19E-02	1,44E-06	4,93E-12	8,64E-02	1,73E-06	5,92E-12	2,81E-02	5,63E-07	1,93E-12
193395	Indéno pyrène	3,00E-02	-	2,06E-10	5,50E-02	-	3,77E-10	2,43E-01	-	1,67E-09	5,14E-01	-	3,52E-09	1,00E-01	-	6,89E-10
91203	Naphtalène	9,25E-03	3,70E-07	6,34E-13	1,35E-02	5,40E-07	9,26E-13	8,66E-02	3,46E-06	5,94E-12	1,94E-01	7,75E-06	1,33E-11	2,26E-02	9,06E-07	1,55E-12
85018	Phénanthrène	3,83E-02	7,65E-07	2,62E-12	7,15E-02	1,43E-06	4,90E-12	4,54E-01	9,07E-06	3,11E-11	9,54E-01	1,91E-05	6,54E-11	1,68E-01	3,36E-06	1,15E-11
129000	Pyrène	6,58E-02	1,75E-06	4,51E-12	8,15E-02	2,17E-06	5,59E-12	1,29E+00	3,44E-05	8,85E-11	3,07E+00	8,17E-05	2,10E-10	2,44E-01	6,50E-06	1,67E-11
1336363	PCB	4,90E-02	1,96E-03	3,36E-08	4,90E-02	1,96E-03	3,36E-08	5,53E-02	2,21E-03	3,79E-08	6,45E-02	2,58E-03	4,43E-08	4,90E-02	1,96E-03	3,36E-08
		Σ	**7,17E-02**	**1,47E-05**	**Σ**	**1,09E-01**	**1,88E-05**	**Σ**	**1,01E-01**	**1,60E-05**	**Σ**	**8,01E-02**	**1,93E-05**	**Σ**	**5,67E-02**	**1,20E-05**

Tableau 87 : Scénario square – Promeneurs enfants - Chargé d'entretien – Calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Square																	
Promeneur enfant		Echantillons TA/CO			Echantillons BR/CO			Echantillons BA/DR/CO			Echantillons TA/BA/BS			Echantillons TA/BE/DV		
n° CAS	Eléments	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé
		mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-
7440360	Sb	3,90E+00	6,83E-02	-	7,00E+00	1,23E-01	-	1,50E+01	2,63E-01	-	4,20E+00	7,35E-02	-	2,10E+00	3,68E-02	-
7440393	Ba	4,75E+02	1,66E-02	-	3,27E+02	1,14E-02	-	2,88E+02	1,01E-02	-	3,39E+02	1,19E-02	-	5,03E+02	1,76E-02	-
7439987	Mo	1,40E+00	1,96E-03	-	4,20E+00	5,88E-03	-	3,70E+00	5,18E-03	-	2,30E+00	3,22E-03	-	9,00E-01	1,26E-03	-
7440315	Sn	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-
7782492	Se	5,00E-01	7,00E-04	-	5,00E-01	7,00E-04	-	5,00E-01	7,00E-04	-	5,00E-01	7,00E-04	-	5,00E-01	7,00E-04	-
7439921	Pb	2,40E+01	4,67E-02	1,22E-07	4,60E+01	8,94E-02	2,35E-07	4,00E+01	7,78E-02	2,04E-07	1,80E+01	3,50E-02	9,18E-08	2,00E+01	3,89E-02	1,02E-07
7440666	Zn	1,12E+02	2,61E-03	-	3,19E+02	7,44E-03	-	2,57E+02	6,00E-03	-	1,19E+02	2,78E-03	-	5,90E+01	1,38E-03	-
18540299	Cr (+VI)	4,80E+01	1,12E-01	1,21E-05	4,00E+01	9,33E-02	1,01E-05	5,60E+01	1,31E-01	1,41E-05	7,90E+01	1,84E-01	1,99E-05	4,00E+01	9,33E-02	1,01E-05
16065831	Cr (+III)	4,80E+01	2,24E-04	-	4,00E+01	1,87E-04	-	5,60E+01	2,61E-04	-	7,90E+01	3,69E-04	-	4,00E+01	1,87E-04	-
7440508	Cu	4,40E+01	2,20E-03	-	1,34E+02	6,70E-03	-	1,24E+02	6,20E-03	-	6,30E+01	3,15E-03	-	3,50E+01	1,75E-03	-
7440439	Cd	2,00E-01	2,80E-03	-	5,00E-01	7,00E-03	-	3,00E-01	4,20E-03	-	2,00E-01	2,80E-03	-	5,00E-02	7,00E-04	-
7440382	As	1,50E+01	3,50E-01	1,35E-05	2,50E+01	5,83E-01	2,25E-05	1,50E+01	3,50E-01	1,35E-05	1,50E+01	3,50E-01	1,35E-05	1,20E+01	2,80E-01	1,08E-05
7439976	Hg inorganique/élémentaire	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
115093 22967926	Hg organique	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
7440020	Ni	1,70E+01	5,95E-03	-	1,90E+01	6,65E-03	-	2,40E+01	8,40E-03	-	2,60E+01	9,10E-03	-	1,80E+01	6,30E-03	-
208968	Acénaphtylène	1,12E-01	-	1,34E-11	1,74E-01	-	2,08E-11	1,24E-01	-	1,49E-11	5,00E-02	-	6,00E-12	5,21E-02	-	6,25E-12
83329	Acénaphtène	5,00E-03	5,83E-07	6,00E-13	5,00E-03	5,83E-07	6,00E-13	2,96E-02	3,45E-06	3,55E-12	6,61E-02	7,72E-06	7,94E-12	1,57E-02	1,83E-06	1,89E-12
120127	Anthracène	7,25E-03	1,69E-07	8,70E-12	9,50E-03	2,22E-07	1,14E-11	5,90E-02	1,38E-06	7,08E-11	1,32E-01	3,07E-06	1,58E-10	3,52E-02	8,22E-07	4,23E-11
56553	Benzo (a) anthracène	3,85E-02	-	4,62E-10	5,20E-02	-	6,24E-10	4,32E-01	-	5,19E-09	9,90E-01	-	1,19E-08	1,11E-01	-	1,34E-09
50328	Benzo (a) pyrène	3,33E-02	-	3,99E-09	6,15E-02	-	7,38E-09	3,55E-01	-	4,26E-08	7,57E-01	-	9,09E-08	1,51E-01	-	1,81E-08
205992	Benzo (b) fluoranthène	5,63E-02	-	6,75E-10	8,75E-02	-	1,05E-09	8,25E-01	-	9,90E-09	1,86E+00	-	2,23E-08	1,96E-01	-	2,35E-09
191242	Benzo (ghi) pérylène	3,08E-02	7,18E-06	3,69E-11	5,65E-02	1,32E-05	6,78E-11	2,05E-01	4,78E-05	2,46E-10	3,95E-01	9,21E-05	4,74E-10	1,13E-01	2,64E-05	1,36E-10
207089	Benzo (k) fluoranthène	2,05E-02	-	2,46E-10	3,60E-02	-	4,32E-10	3,61E-01	-	4,33E-09	8,16E-01	-	9,79E-09	8,55E-02	-	1,03E-09
218019	Chrysène	2,78E-02	-	3,33E-11	5,05E-02	-	6,06E-11	6,76E-01	-	8,12E-10	1,54E+00	-	1,84E-09	1,05E-01	-	1,26E-10
53703	Dibenzo (ah) anthracène	7,00E-03	-	8,40E-10	9,00E-03	-	1,08E-09	2,75E-02	-	3,30E-09	5,46E-02	-	6,55E-09	1,19E-02	-	1,43E-09
206440	Fluoranthène	7,28E-02	1,27E-05	8,73E-12	9,55E-02	1,67E-05	1,15E-11	1,77E+00	3,09E-04	2,12E-10	4,15E+00	7,27E-04	4,98E-10	2,35E-01	4,11E-05	2,82E-11
86737	Fluorène	3,13E-02	5,47E-06	3,75E-12	5,75E-02	1,01E-05	6,90E-12	7,19E-02	1,26E-05	8,63E-12	8,64E-02	1,51E-05	1,04E-11	2,81E-02	4,92E-06	3,38E-12
193395	Indéno pyrène	3,00E-02	-	3,60E-10	5,50E-02	-	6,60E-10	2,43E-01	-	2,92E-09	5,14E-01	-	6,16E-09	1,00E-01	-	1,21E-09
91203	Naphtalène	9,25E-03	3,24E-06	1,11E-12	1,35E-02	4,73E-06	1,62E-12	8,66E-02	3,03E-05	1,04E-11	1,94E-01	6,78E-05	2,32E-11	2,26E-02	7,92E-06	2,72E-12
85018	Phénanthrène	3,83E-02	6,69E-06	4,59E-12	7,15E-02	1,25E-05	8,58E-12	4,54E-01	7,94E-05	5,44E-11	9,54E-01	1,67E-04	1,14E-10	1,68E-01	2,94E-05	2,02E-11
129000	Pyrène	6,58E-02	1,53E-05	7,89E-12	8,15E-02	1,90E-05	9,78E-12	1,29E+00	3,01E-04	1,55E-10	3,07E+00	7,15E-04	3,68E-10	2,44E-01	5,69E-05	2,93E-11
1336363	PCB	4,90E-02	1,72E-02	5,88E-08	4,90E-02	1,72E-02	5,88E-08	5,53E-02	1,94E-02	6,64E-08	6,45E-02	2,26E-02	7,74E-08	4,90E-02	1,72E-02	5,88E-08
		Σ	**6,27E-01**	**2,58E-05**	**Σ**	**9,52E-01**	**3,29E-05**	**Σ**	**8,82E-01**	**2,80E-05**	**Σ**	**7,01E-01**	**3,37E-05**	**Σ**	**4,96E-01**	**2,11E-05**

Tableau 88 : Scénario square – Chargé d'entretien – Calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Square																	
Chargé d'entretien		Echantillons TA/CO			Echantillons BR/CO			Echantillons BA/DR/CO			Echantillons TA/BA/BS			Echantillons TA/BE/DV		
n° CAS	Eléments	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé
		mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-
7440360	Sb	3,90E+00	2,01E-03	-	7,00E+00	3,61E-03	-	1,50E+01	7,73E-03	-	4,20E+00	2,16E-03	-	2,10E+00	1,08E-03	-
7440393	Ba	4,75E+02	4,89E-04	-	3,27E+02	3,37E-04	-	2,88E+02	2,97E-04	-	3,39E+02	3,49E-04	-	5,03E+02	5,18E-04	-
7439987	Mo	1,40E+00	5,77E-05	-	4,20E+00	1,73E-04	-	3,70E+00	1,52E-04	-	2,30E+00	9,48E-05	-	9,00E-01	3,71E-05	-
7440315	Sn	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-
7782492	Se	5,00E-01	2,06E-05	-	5,00E-01	2,06E-05	-	5,00E-01	2,06E-05	-	5,00E-01	2,06E-05	-	5,00E-01	2,06E-05	-
7439921	Pb	2,40E+01	1,37E-03	2,40E-08	4,60E+01	2,63E-03	4,60E-08	4,00E+01	2,29E-03	4,00E-08	1,80E+01	1,03E-03	1,80E-08	2,00E+01	1,14E-03	2,00E-08
7440666	Zn	1,12E+02	7,69E-05	-	3,19E+02	2,19E-04	-	2,57E+02	1,76E-04	-	1,19E+02	8,17E-05	-	5,90E+01	4,05E-05	-
18540299	Cr (+VI)	4,80E+01	3,30E-03	2,37E-06	4,00E+01	2,75E-03	1,98E-06	5,60E+01	3,85E-03	2,77E-06	7,90E+01	5,43E-03	3,91E-06	4,00E+01	2,75E-03	1,98E-06
16065831	Cr (+III)	4,80E+01	6,59E-06	-	4,00E+01	5,49E-06	-	5,60E+01	7,69E-06	-	7,90E+01	1,09E-05	-	4,00E+01	5,49E-06	-
7440508	Cu	4,40E+01	6,48E-05	-	1,34E+02	1,97E-04	-	1,24E+02	1,82E-04	-	6,30E+01	9,27E-05	-	3,50E+01	5,15E-05	-
7440439	Cd	2,00E-01	8,24E-05	-	5,00E-01	2,06E-04	-	3,00E-01	1,24E-04	-	2,00E-01	8,24E-05	-	5,00E-02	2,06E-05	-
7440382	As	1,50E+01	1,03E-02	2,65E-06	2,50E+01	1,72E-02	4,41E-06	1,50E+01	1,03E-02	2,65E-06	1,50E+01	1,03E-02	2,65E-06	1,20E+01	8,24E-03	2,12E-06
7439976	Hg inorganique/élémentaire	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
115093 22967926	Hg organique	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
7440020	Ni	1,70E+01	1,75E-04	-	1,90E+01	1,96E-04	-	2,40E+01	2,47E-04	-	2,60E+01	2,68E-04	-	1,80E+01	1,85E-04	-
208968	Acénaphtylène	1,12E-01	-	2,63E-12	1,74E-01	-	4,09E-12	1,24E-01	-	2,92E-12	5,00E-02	-	1,18E-12	5,21E-02	-	1,23E-12
83329	Acénaphtène	5,00E-03	1,72E-08	1,18E-13	5,00E-03	1,72E-08	1,18E-13	2,96E-02	1,02E-07	6,97E-13	6,61E-02	2,27E-07	1,56E-12	1,57E-02	5,39E-08	3,70E-13
120127	Anthracène	7,25E-03	4,98E-09	1,71E-12	9,50E-03	6,52E-09	2,24E-12	5,90E-02	4,05E-08	1,39E-11	1,32E-01	9,03E-08	3,10E-11	3,52E-02	2,42E-08	8,30E-12
56553	Benzo (a) anthracène	3,85E-02	-	9,07E-11	5,20E-02	-	1,22E-10	4,32E-01	-	1,02E-09	9,90E-01	-	2,33E-09	1,11E-01	-	2,62E-10
50328	Benzo (a) pyrène	3,33E-02	-	7,83E-10	6,15E-02	-	1,45E-09	3,55E-01	-	8,36E-09	7,57E-01	-	1,78E-08	1,51E-01	-	3,56E-09
205992	Benzo (b) fluoranthène	5,63E-02	-	1,32E-10	8,75E-02	-	2,06E-10	8,25E-01	-	1,94E-09	1,86E+00	-	4,38E-09	1,96E-01	-	4,61E-10
191242	Benzo (ghi) pérylène	3,08E-02	2,11E-07	7,24E-12	5,65E-02	3,88E-07	1,33E-11	2,05E-01	1,41E-06	4,82E-11	3,95E-01	2,71E-06	9,29E-11	1,13E-01	7,77E-07	2,66E-11
207089	Benzo (k) fluoranthène	2,05E-02	-	4,83E-11	3,60E-02	-	8,48E-11	3,61E-01	-	8,49E-10	8,16E-01	-	1,92E-09	8,55E-02	-	2,01E-10
218019	Chrysène	2,78E-02	-	6,53E-12	5,05E-02	-	1,19E-11	6,76E-01	-	1,59E-10	1,54E+00	-	3,61E-10	1,05E-01	-	2,48E-11
53703	Dibenzo (ah) anthracène	7,00E-03	-	1,65E-10	9,00E-03	-	2,12E-10	2,75E-02	-	6,48E-10	5,46E-02	-	1,29E-09	1,19E-02	-	2,81E-10
206440	Fluoranthène	7,28E-02	3,75E-07	1,71E-12	9,55E-02	4,92E-07	2,25E-12	1,77E+00	9,11E-06	4,16E-11	4,15E+00	2,14E-05	9,78E-11	2,35E-01	1,21E-06	5,53E-12
86737	Fluorène	3,13E-02	1,61E-07	7,36E-13	5,75E-02	2,96E-07	1,35E-12	7,19E-02	3,70E-07	1,69E-12	8,64E-02	4,45E-07	2,03E-12	2,81E-02	1,45E-07	6,62E-13
193395	Indéno pyrène	3,00E-02	-	7,06E-11	5,50E-02	-	1,30E-10	2,43E-01	-	5,73E-10	5,14E-01	-	1,21E-09	1,00E-01	-	2,37E-10
91203	Naphtalène	9,25E-03	9,53E-08	2,18E-13	1,35E-02	1,39E-07	3,18E-13	8,66E-02	8,92E-07	2,04E-12	1,94E-01	2,00E-06	4,56E-12	2,26E-02	2,33E-07	5,33E-13
85018	Phénanthrène	3,83E-02	1,97E-07	9,01E-13	7,15E-02	3,68E-07	1,68E-12	4,54E-01	2,34E-06	1,07E-11	9,54E-01	4,91E-06	2,25E-11	1,68E-01	8,66E-07	3,96E-12
129000	Pyrène	6,58E-02	4,52E-07	1,55E-12	8,15E-02	5,60E-07	1,92E-12	1,29E+00	8,86E-06	3,04E-11	3,07E+00	2,10E-05	7,22E-11	2,44E-01	1,67E-06	5,74E-12
1336363	PCB	4,90E-02	5,05E-04	1,15E-08	4,90E-02	5,05E-04	1,15E-08	5,53E-02	5,70E-04	1,30E-08	6,45E-02	6,65E-04	1,52E-08	4,90E-02	5,05E-04	1,15E-08
		Σ	**1,85E-02**	**5,06E-06**	**Σ**	**2,80E-02**	**6,45E-06**	**Σ**	**2,60E-02**	**5,48E-06**	**Σ**	**2,06E-02**	**6,62E-06**	**Σ**	**1,46E-02**	**4,13E-06**

Les tableaux suivants présentent les résumés des résultats des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges.

Tableau 89 : Scénario square – Promeneurs adultes – Résumé des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Square Promeneur adulte		Echantillons TA/CO		Echantillons BR/CO		Echantillons BA/DR/CO		Echantillons TA/BA/BS		Echantillons TA/BE/DV	
n° CAS	Eléments	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7440360	Sb	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440393	Ba	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7439987	Mo	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440315	Sn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7782492	Se	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7439921	Pb	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
7440666	Zn	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
18540299	Cr (+VI)	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON
16065831	Cr (+III)	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440508	Cu	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440439	Cd	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440382	As	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON
7439976	Hg inorganique/élémentaire	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
115093 22967926	Hg organique	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440020	Ni	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
208968	Acénaphtylène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
83329	Acénaphtène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
120127	Anthracène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
56553	Benzo (a) anthracène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
50328	Benzo (a) pyrène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
205992	Benzo (b) fluoranthène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
191242	Benzo (ghi) pérylène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
207089	Benzo (k) floranthène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
218019	Chrysène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
53703	Dibenzo (ah) anthracène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
206440	Fluoranthène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
86737	Fluorène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
193395	Indéno pyrène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
91203	Naphtalène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
85018	Phénanthrène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
129000	Pyrène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
1336363	PCB	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Tableau 90 : Scénario square – Promeneurs enfants – Résumé des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Square Promeneur enfant		Echantillons TA/CO		Echantillons BR/CO		Echantillons BA/DR/CO		Echantillons TA/BA/BS		Echantillons TA/BE/DV	
n° CAS	Eléments	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7440360	Sb	OK	-	OK	-	NON	-	OK	-	OK	-
7440393	Ba	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7439987	Mo	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440315	Sn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7782492	Se	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7439921	Pb	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
7440666	Zn	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
18540299	Cr (+VI)	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON
16065831	Cr (+III)	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440508	Cu	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440439	Cd	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440382	As	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON
7439976	Hg inorganique/élémentaire	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
115093 22967926	Hg organique	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440020	Ni	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
208968	Acénaphtylène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
83329	Acénaphtène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
120127	Anthracène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
56553	Benzo (a) anthracène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
50328	Benzo (a) pyrène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
205992	Benzo (b) fluoranthène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
191242	Benzo (ghi) pérylène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
207089	Benzo (k) floranthène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
218019	Chrysène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
53703	Dibenzo (ah) anthracène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
206440	Fluoranthène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
86737	Fluorène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
193395	Indéno pyrène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
91203	Naphtalène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
85018	Phénanthrène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
129000	Pyrène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
1336363	PCB	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Tableau 91 : Scénario square –- Chargé d'entretien – Résumé des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Square Chargé d'entretien		Echantillons TA/CO		Echantillons BR/CO		Echantillons BA/DR/CO		Echantillons TA/BA/BS		Echantillons TA/BE/DV	
n° CAS	Eléments	QD calculé -	ERI calculé -	QD calculé -	ERI calculé -	QD calculé -	ERI calculé -	QD calculé -	ERI calculé -	QD calculé -	ERI calculé -
7440360	Sb	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440393	Ba	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7439987	Mo	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440315	Sn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7782492	Se	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7439921	Pb	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
7440666	Zn	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
18540299	Cr (+VI)	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON
16065831	Cr (+III)	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440508	Cu	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440439	Cd	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440382	As	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON
7439976	Hg inorganique/élémentaire	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
115093 22967926	Hg organique	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440020	Ni	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
208968	Acénaphtylène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
83329	Acénaphtène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
120127	Anthracène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
56553	Benzo (a) anthracène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
50328	Benzo (a) pyrène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
205992	Benzo (b) fluoranthène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
191242	Benzo (ghi) pérylène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
207089	Benzo (k) floranthène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
218019	Chrysène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
53703	Dibenzo (ah) anthracène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
206440	Fluoranthène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
86737	Fluorène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
193395	Indéno pyrène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
91203	Naphtalène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
85018	Phénanthrène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
129000	Pyrène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
1336363	PCB	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Les tableaux suivants présentent les résumés des concentrations dépassant les valeurs limites en fonction des différents mélanges.

Tableau 92 : Scénario square –- Promeneurs adultes – Résumé des concentrations dépassant les valeurs limites suite aux calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Square Promeneur adulte		Echantillons TA/CO		Echantillons BR/CO		Echantillons BA/DR/CO		Echantillons TA/BA/BS		Echantillons TA/BE/DV	
n° CAS	Eléments	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg
7440360	Sb	9,61E+01	-	9,30E+01	-	8,50E+01	-	9,58E+01	-	9,79E+01	-
7440393	Ba	4,95E+04	-	4,97E+04	-	4,97E+04	-	4,97E+04	-	4,95E+04	-
7439987	Mo	1,25E+03	-	1,25E+03	-	1,25E+03	-	1,25E+03	-	1,25E+03	-
7440315	Sn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7782492	Se	1,25E+03	-	1,25E+03	-	1,25E+03	-	1,25E+03	-	1,25E+03	-
7439921	Pb	8,76E+02	3,19E+02	8,54E+02	2,97E+02	8,60E+02	3,03E+02	8,82E+02	3,25E+02	8,80E+02	3,23E+02
7440666	Zn	7,49E+04	-	7,47E+04	-	7,47E+04	-	7,49E+04	-	7,49E+04	-
18540299	Cr (+VI)	7,02E+02	-4,11E+01	7,10E+02	-3,31E+01	6,94E+02	-4,91E+01	6,71E+02	-7,21E+01	7,10E+02	-3,31E+01
16065831	Cr (+III)	3,75E+05	-	3,75E+05	-	3,75E+05	-	3,75E+05	-	3,75E+05	-
7440508	Cu	3,50E+04	-	3,49E+04	-	3,49E+04	-	3,49E+04	-	3,50E+04	-
7440439	Cd	1,25E+02	-	1,25E+02	-	1,25E+02	-	1,25E+02	-	1,25E+02	-
7440382	As	6,00E+01	-1,31E+01	5,00E+01	-2,31E+01	6,00E+01	-1,31E+01	6,00E+01	-1,31E+01	6,30E+01	-1,01E+01
7439976	Hg inorganique/élémentaire	7,50E+01	-	7,50E+01	-	7,50E+01	-	7,50E+01	-	7,50E+01	-
115093 22967926	Hg organique	2,50E+01	-	2,50E+01	-	2,50E+01	-	2,50E+01	-	2,50E+01	-
7440020	Ni	4,98E+03	-	4,98E+03	-	4,98E+03	-	4,97E+03	-	4,98E+03	-
208968	Acénaphtylène	-	1,46E+04	-	1,46E+04	-	1,46E+04	-	1,46E+04	-	1,46E+04
83329	Acénaphtène	1,50E+04	1,46E+04	1,50E+04	1,46E+04	1,50E+04	1,46E+04	1,50E+04	1,46E+04	1,50E+04	1,46E+04
120127	Anthracène	7,50E+04	1,46E+03	7,50E+04	1,46E+03	7,50E+04	1,46E+03	7,50E+04	1,46E+03	7,50E+04	1,46E+03
56553	Benzo (a) anthracène	-	1,46E+02	-	1,46E+02	-	1,45E+02	-	1,45E+02	-	1,46E+02
50328	Benzo (a) pyrène	-	1,46E+01	-	1,45E+01	-	1,42E+01	-	1,38E+01	-	1,44E+01
205992	Benzo (b) fluoranthène	-	1,46E+02	-	1,46E+02	-	1,45E+02	-	1,44E+02	-	1,46E+02
191242	Benzo (ghi) pérylène	7,50E+03	1,46E+03	7,50E+03	1,46E+03	7,50E+03	1,46E+03	7,50E+03	1,46E+03	7,50E+03	1,46E+03
207089	Benzo (k) floranthène	-	1,46E+02	-	1,46E+02	-	1,45E+02	-	1,45E+02	-	1,46E+02
218019	Chrysène	-	1,46E+03	-	1,46E+03	-	1,46E+03	-	1,46E+03	-	1,46E+03
53703	Dibenzo (ah) anthracène	-	1,46E+01	-	1,46E+01	-	1,46E+01	-	1,45E+01	-	1,46E+01
206440	Fluoranthène	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04	1,46E+04
86737	Fluorène	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04	1,46E+04
193395	Indéno pyrène	-	1,46E+02	-	1,46E+02	-	1,46E+02	-	1,45E+02	-	1,46E+02
91203	Naphtalène	5,00E+03	1,46E+04	5,00E+03	1,46E+04	5,00E+03	1,46E+04	5,00E+03	1,46E+04	5,00E+03	1,46E+04
85018	Phénanthrène	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04	1,46E+04	1,00E+04	1,46E+04
129000	Pyrène	7,50E+03	1,46E+04	7,50E+03	1,46E+04	7,50E+03	1,46E+04	7,50E+03	1,46E+04	7,50E+03	1,46E+04
1336363	PCB	4,95E+00	1,41E+00	4,95E+00	1,41E+00	4,94E+00	1,40E+00	4,94E+00	1,39E+00	4,95E+00	1,41E+00

Tableau 93 : Scénario square –- Promeneurs enfants – Résumé des concentrations dépassant les valeurs limites suite aux calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Square Promeneur enfant		Echantillons TA/CO		Echantillons BR/CO		Echantillons BA/DR/CO		Echantillons TA/BA/BS		Echantillons TA/BE/DV	
n° CAS	Eléments	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg
7440360	Sb	7,53E+00	-	4,43E+00	-	-3,57E+00	-	7,23E+00	-	9,33E+00	-
7440393	Ba	5,24E+03	-	5,39E+03	-	5,43E+03	-	5,38E+03	-	5,21E+03	-
7439987	Mo	1,41E+02	-	1,39E+02	-	1,39E+02	-	1,41E+02	-	1,42E+02	-
7440315	Sn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7782492	Se	1,42E+02	-	1,42E+02	-	1,42E+02	-	1,42E+02	-	1,42E+02	-
7439921	Pb	7,89E+01	1,72E+02	5,69E+01	1,50E+02	6,29E+01	1,56E+02	8,49E+01	1,78E+02	8,29E+01	1,76E+02
7440666	Zn	8,46E+03	-	8,25E+03	-	8,31E+03	-	8,45E+03	-	8,51E+03	-
18540299	Cr (+VI)	3,77E+01	-4,40E+01	4,57E+01	-3,60E+01	2,97E+01	-5,20E+01	6,71E+00	-7,50E+01	4,57E+01	-3,60E+01
16065831	Cr (+III)	4,28E+04	-	4,28E+04	-	4,28E+04	-	4,28E+04	-	4,28E+04	-
7440508	Cu	3,96E+03	-	3,87E+03	-	3,88E+03	-	3,94E+03	-	3,97E+03	-
7440439	Cd	1,41E+01	-	1,38E+01	-	1,40E+01	-	1,41E+01	-	1,42E+01	-
7440382	As	-6,43E+00	-1,39E+01	-1,64E+01	-2,39E+01	-6,43E+00	-1,39E+01	-6,43E+00	-1,39E+01	-3,43E+00	-1,09E+01
7439976	Hg inorganique/élémentaire	8,57E+00	-	8,57E+00	-	8,57E+00	-	8,57E+00	-	8,57E+00	-
115093 22967926	Hg organique	2,86E+00	-	2,86E+00	-	2,86E+00	-	2,86E+00	-	2,86E+00	-
7440020	Ni	5,54E+02	-	5,52E+02	-	5,47E+02	-	5,45E+02	-	5,53E+02	-
208968	Acénaphtylène	-	8,33E+03	-	8,33E+03	-	8,33E+03	-	8,33E+03	-	8,33E+03
83329	Acénaphtène	1,71E+03	8,33E+03	1,71E+03	8,33E+03	1,71E+03	8,33E+03	1,71E+03	8,33E+03	1,71E+03	8,33E+03
120127	Anthracène	8,57E+03	8,33E+02	8,57E+03	8,33E+02	8,57E+03	8,33E+02	8,57E+03	8,33E+02	8,57E+03	8,33E+02
56553	Benzo (a) anthracène	-	8,33E+01	-	8,33E+01	-	8,29E+01	-	8,23E+01	-	8,32E+01
50328	Benzo (a) pyrène	-	8,30E+00	-	8,27E+00	-	7,98E+00	-	7,58E+00	-	8,18E+00
205992	Benzo (b) fluoranthène	-	8,33E+01	-	8,32E+01	-	8,25E+01	-	8,15E+01	-	8,31E+01
191242	Benzo (ghi) pérylène	8,57E+02	8,33E+02	8,57E+02	8,33E+02	8,57E+02	8,33E+02	8,57E+02	8,33E+02	8,57E+02	8,33E+02
207089	Benzo (k) floranthène	-	8,33E+01	-	8,33E+01	-	8,30E+01	-	8,25E+01	-	8,32E+01
218019	Chrysène	-	8,33E+02	-	8,33E+02	-	8,33E+02	-	8,32E+02	-	8,33E+02
53703	Dibenzo (ah) anthracène	-	8,33E+00	-	8,32E+00	-	8,31E+00	-	8,28E+00	-	8,32E+00
206440	Fluoranthène	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03	8,33E+03
86737	Fluorène	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03	8,33E+03
193395	Indéno pyrène	-	8,33E+01	-	8,33E+01	-	8,31E+01	-	8,28E+01	-	8,32E+01
91203	Naphtalène	5,71E+02	8,33E+03	5,71E+02	8,33E+03	5,71E+02	8,33E+03	5,71E+02	8,33E+03	5,71E+02	8,33E+03
85018	Phénanthrène	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03	8,33E+03	1,14E+03	8,33E+03
129000	Pyrène	8,57E+02	8,33E+03	8,57E+02	8,33E+03	8,56E+02	8,33E+03	8,54E+02	8,33E+03	8,57E+02	8,33E+03
1336363	PCB	5,22E-01	7,84E-01	5,22E-01	7,84E-01	5,16E-01	7,78E-01	5,07E-01	7,69E-01	5,22E-01	7,84E-01

Tableau 94 : Scénario square –- Chargé d'entretien – Résumé des concentrations dépassant les valeurs limites suite aux calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Square Chargé d'entretien		Echantillons TA/CO		Echantillons BR/CO		Echantillons BA/DR/CO		Echantillons TA/BA/BS		Echantillons TA/BE/DV	
n° CAS	Eléments	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg
7440360	Sb	3,84E+02	-	3,81E+02	-	3,73E+02	-	3,84E+02	-	3,86E+02	-
7440393	Ba	1,94E+05	-	1,94E+05	-	1,94E+05	-	1,94E+05	-	1,94E+05	-
7439987	Mo	4,85E+03	-	4,85E+03	-	4,85E+03	-	4,85E+03	-	4,85E+03	-
7440315	Sn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7782492	Se	4,85E+03	-	4,85E+03	-	4,85E+03	-	4,85E+03	-	4,85E+03	-
7439921	Pb	3,47E+03	9,75E+02	3,45E+03	9,53E+02	3,45E+03	9,59E+02	3,48E+03	9,81E+02	3,47E+03	9,79E+02
7440666	Zn	2,91E+05	-	2,91E+05	-	2,91E+05	-	2,91E+05	-	2,91E+05	-
18540299	Cr (+VI)	2,86E+03	-2,78E+01	2,87E+03	-1,98E+01	2,86E+03	-3,58E+01	2,83E+03	-5,88E+01	2,87E+03	-1,98E+01
16065831	Cr (+III)	1,46E+06	-	1,46E+06	-	1,46E+06	-	1,46E+06	-	1,46E+06	-
7440508	Cu	1,36E+05	-	1,36E+05	-	1,36E+05	-	1,36E+05	-	1,36E+05	-
7440439	Cd	4,85E+02	-	4,85E+02	-	4,85E+02	-	4,85E+02	-	4,85E+02	-
7440382	As	2,76E+02	-9,34E+00	2,66E+02	-1,93E+01	2,76E+02	-9,34E+00	2,76E+02	-9,34E+00	2,79E+02	-6,34E+00
7439976	Hg inorganique/élémentaire	2,91E+02	-	2,91E+02	-	2,91E+02	-	2,91E+02	-	2,91E+02	-
115093 22967926	Hg organique	9,71E+01	-	9,71E+01	-	9,71E+01	-	9,71E+01	-	9,71E+01	-
7440020	Ni	1,94E+04	-	1,94E+04	-	1,94E+04	-	1,94E+04	-	1,94E+04	-
208968	Acénaphtylène	-	4,25E+04	-	4,25E+04	-	4,25E+04	-	4,25E+04	-	4,25E+04
83329	Acénaphtène	5,82E+04	4,25E+04	5,82E+04	4,25E+04	5,82E+04	4,25E+04	5,82E+04	4,25E+04	5,82E+04	4,25E+04
120127	Anthracène	2,91E+05	4,25E+03	2,91E+05	4,25E+03	2,91E+05	4,25E+03	2,91E+05	4,25E+03	2,91E+05	4,25E+03
56553	Benzo (a) anthracène	-	4,25E+02	-	4,25E+02	-	4,24E+02	-	4,24E+02	-	4,25E+02
50328	Benzo (a) pyrène	-	4,24E+01	-	4,24E+01	-	4,21E+01	-	4,17E+01	-	4,23E+01
205992	Benzo (b) fluoranthène	-	4,25E+02	-	4,25E+02	-	4,24E+02	-	4,23E+02	-	4,25E+02
191242	Benzo (ghi) pérylène	2,91E+04	4,25E+03	2,91E+04	4,25E+03	2,91E+04	4,25E+03	2,91E+04	4,25E+03	2,91E+04	4,25E+03
207089	Benzo (k) floranthène	-	4,25E+02	-	4,25E+02	-	4,24E+02	-	4,24E+02	-	4,25E+02
218019	Chrysène	-	4,25E+03	-	4,25E+03	-	4,25E+03	-	4,25E+03	-	4,25E+03
53703	Dibenzo (ah) anthracène	-	4,25E+01	-	4,25E+01	-	4,24E+01	-	4,24E+01	-	4,25E+01
206440	Fluoranthène	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04
86737	Fluorène	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04
193395	Indéno pyrène	-	4,25E+02	-	4,25E+02	-	4,24E+02	-	4,24E+02	-	4,25E+02
91203	Naphtalène	1,94E+04	4,25E+04	1,94E+04	4,25E+04	1,94E+04	4,25E+04	1,94E+04	4,25E+04	1,94E+04	4,25E+04
85018	Phénanthrène	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04
129000	Pyrène	2,91E+04	4,25E+04	2,91E+04	4,25E+04	2,91E+04	4,25E+04	2,91E+04	4,25E+04	2,91E+04	4,25E+04
1336363	PCB	1,94E+01	4,20E+00	1,94E+01	4,20E+00	1,94E+01	4,19E+00	1,94E+01	4,18E+00	1,94E+01	4,20E+00

Résultats du scenario alignement

Les tableaux suivants présentent les choix des paramètres d'exposition et les valeurs limites calculées dans les sols pour les effets à seuils et les effets sans seuils.

Tableau 95 : Scénario alignement - Promeneurs adultes - Choix des paramètres d'exposition et valeurs limites calculées dans les sols pour les effets à seuils et les effets sans seuils

Alignement

Promeneur adulte

n° CAS	Eléments	QD max	ERI max	Q sol	NbJ	DE	Poids	VTR à seuil	VTR sans seuil	Teneur maximale dans le sol - effets à seuil	Teneur maximale dans le sol - effets sans seuil	Teneur maximale dans le sol - tout effet
		-	-	kg/j	j	an	kg	mg/kg/j	(mg/kg/j)-1	mg/kg	mg/kg	mg/kg
7440360	Sb	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	4,0E-04	-	5,00E+02	-	5,00E+02
7440393	Ba	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	2,0E-01	-	2,50E+05	-	2,50E+05
7439987	Mo	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	5,0E-03	-	6,25E+03	-	6,25E+03
7440315	Sn	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	-	-	-	-	-
7782492	Se	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	5,0E-03	-	6,25E+03	-	6,25E+03
7439921	Pb	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	3,6E-03	8,5E-03	4,50E+03	1,72E+03	1,72E+03
7440666	Zn	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	3,0E-01	-	3,75E+05	-	3,75E+05
18540299	Cr (+VI)	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	3,0E-03	4,2E-01	3,75E+03	3,47E+01	3,47E+01
16065831	Cr (+III)	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	1,5E+00	-	1,88E+06	-	1,88E+06
7440508	Cu	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	1,4E-01	-	1,75E+05	-	1,75E+05
7440439	Cd	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	5,0E-04	-	6,25E+02	-	6,25E+02
7440382	As	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	3,0E-04	1,5E+00	3,75E+02	9,72E+00	9,72E+00
7439976	Hg inorganique/élémentaire	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	3,0E-04	-	3,75E+02	-	3,75E+02
115093 22967926	Hg organique	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	1,0E-04	-	1,25E+02	-	1,25E+02
7440020	Ni	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	2,0E-02	-	2,50E+04	-	2,50E+04
208968	Acénaphtylène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-04	-	7,29E+04	7,29E+04
83329	Acénaphtène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	6,0E-02	2,0E-04	7,50E+04	7,29E+04	7,29E+04
120127	Anthracène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	3,0E-01	2,0E-03	3,75E+05	7,29E+03	7,29E+03
56553	Benzo (a) anthracène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-02	-	7,29E+02	7,29E+02
50328	Benzo (a) pyrène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-01	-	7,29E+01	7,29E+01
205992	Benzo (b) fluoranthène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-02	-	7,29E+02	7,29E+02
191242	Benzo (ghi) pérylène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	3,0E-02	2,0E-03	3,75E+04	7,29E+03	7,29E+03
207089	Benzo (k) floranthène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-02	-	7,29E+02	7,29E+02
218019	Chrysène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-03	-	7,29E+03	7,29E+03
53703	Dibenzo (ah) anthracène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-01	-	7,29E+01	7,29E+01
206440	Fluoranthène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	4,0E-02	2,0E-04	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04
86737	Fluorène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	4,0E-02	2,0E-04	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04
193395	Indéno pyrène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	-	2,0E-02	-	7,29E+02	7,29E+02
91203	Naphtalène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	2,0E-02	2,0E-04	2,50E+04	7,29E+04	2,50E+04
85018	Phénanthrène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	4,0E-02	2,0E-04	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04
129000	Pyrène	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	3,0E-02	2,0E-04	3,75E+04	7,29E+04	3,75E+04
1336363	PCB	0,2	1,00E-06	1,00E-05	365	30	62,5	2,0E-05	2,0E+00	2,50E+01	7,29E+00	7,29E+00

Tableau 96 : Scénario alignement – Promeneurs enfants - Choix des paramètres d'exposition et valeurs limites calculées dans les sols pour les effets à seuils et les effets sans seuils

Alignement

Promeneur enfant

n° CAS	Eléments	QD max	ERI max	Q sol	NbJ	DE	Poids	VTR à seuil	VTR sans seuil	Teneur maximale dans le sol - effets à seuil	Teneur maximale dans le sol - effets sans seuil	Teneur maximale dans le sol - tout effet
		-	-	kg/j	j	an	kg	mg/kg/j	(mg/kg/j)-1	mg/kg	mg/kg	mg/kg
7440360	Sb	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	4,0E-04	-	4,33E+01	-	4,33E+01
7440393	Ba	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	2,0E-01	-	2,17E+04	-	2,17E+04
7439987	Mo	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	5,0E-03	-	5,42E+02	-	5,42E+02
7440315	Sn	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	-	-	-	-	-
7782492	Se	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	5,0E-03	-	5,42E+02	-	5,42E+02
7439921	Pb	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	3,6E-03	8,5E-03	3,90E+02	7,43E+02	3,90E+02
7440666	Zn	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	3,0E-01	-	3,25E+04	-	3,25E+04
18540299	Cr (+VI)	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	3,0E-03	4,2E-01	3,25E+02	1,50E+01	1,50E+01
16065831	Cr (+III)	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	1,5E+00	-	1,63E+05	-	1,63E+05
7440508	Cu	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	1,4E-01	-	1,52E+04	-	1,52E+04
7440439	Cd	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	5,0E-04	-	5,42E+01	-	5,42E+01
7440382	As	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	3,0E-04	1,5E+00	3,25E+01	4,21E+00	4,21E+00
7439976	Hg inorganique/élémentaire	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	3,0E-04	-	3,25E+01	-	3,25E+01
115093 22967926	Hg organique	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	1,0E-04	-	1,08E+01	-	1,08E+01
7440020	Ni	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	2,0E-02	-	2,17E+03	-	2,17E+03
208968	Acénaphtylène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	-	2,0E-04	-	3,16E+04	3,16E+04
83329	Acénaphtène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	6,0E-02	2,0E-04	6,50E+03	3,16E+04	6,50E+03
120127	Anthracène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	3,0E-01	2,0E-03	3,25E+04	3,16E+03	3,16E+03
56553	Benzo (a) anthracène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	-	2,0E-02	-	3,16E+02	3,16E+02
50328	Benzo (a) pyrène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	-	2,0E-01	-	3,16E+01	3,16E+01
205992	Benzo (b) fluoranthène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	-	2,0E-02	-	3,16E+02	3,16E+02
191242	Benzo (ghi) pérylène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	3,0E-02	2,0E-03	3,25E+03	3,16E+03	3,16E+03
207089	Benzo (k) floranthène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	-	2,0E-02	-	3,16E+02	3,16E+02
218019	Chrysène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	-	2,0E-03	-	3,16E+03	3,16E+03
53703	Dibenzo (ah) anthracène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	-	2,0E-01	-	3,16E+01	3,16E+01
206440	Fluoranthène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	4,0E-02	2,0E-04	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03
86737	Fluorène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	4,0E-02	2,0E-04	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03
193395	Indéno pyrène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	-	2,0E-02	-	3,16E+02	3,16E+02
91203	Naphtalène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	2,0E-02	2,0E-04	2,17E+03	3,16E+04	2,17E+03
85018	Phénanthrène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	4,0E-02	2,0E-04	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03
129000	Pyrène	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	3,0E-02	2,0E-04	3,25E+03	3,16E+04	3,25E+03
1336363	PCB	0,2	1,00E-06	2,40E-05	365	6	13	2,0E-05	2,0E+00	2,17E+00	3,16E+00	2,17E+00

Tableau 97 : Scénario alignement – Chargé d'entretien - Choix des paramètres d'exposition et valeurs limites calculées dans les sols pour les effets à seuils et les effets sans seuils

Alignement

Chargé d'entretien

n° CAS	Eléments	QD max	ERI max	Q sol	NbJ	DE	Poids	VTR à seuil	VTR sans seuil	Teneur maximale dans le sol - effets à seuil	Teneur maximale dans le sol - effets sans seuil	Teneur maximale dans le sol - tout effet
		-	-	kg/j	j	an	kg	mg/kg/j	(mg/kg/j)-1	mg/kg	mg/kg	mg/kg
7440360	Sb	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	4,0E-04	-	3,88E+02	-	3,88E+02
7440393	Ba	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	2,0E-01	-	1,94E+05	-	1,94E+05
7439987	Mo	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	5,0E-03	-	4,85E+03	-	4,85E+03
7440315	Sn	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	-	-	-	-
7782492	Se	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	5,0E-03	-	4,85E+03	-	4,85E+03
7439921	Pb	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,6E-03	8,5E-03	3,49E+03	9,99E+02	9,99E+02
7440666	Zn	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,0E-01	-	2,91E+05	-	2,91E+05
18540299	Cr (+VI)	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,0E-03	4,2E-01	2,91E+03	2,02E+01	2,02E+01
16065831	Cr (+III)	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	1,5E+00	-	1,46E+06	-	1,46E+06
7440508	Cu	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	1,4E-01	-	1,36E+05	-	1,36E+05
7440439	Cd	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	5,0E-04	-	4,85E+02	-	4,85E+02
7440382	As	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,0E-04	1,5E+00	2,91E+02	5,66E+00	5,66E+00
7439976	Hg inorganique/élémentaire	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,0E-04	-	2,91E+02	-	2,91E+02
115093 22967926	Hg organique	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	1,0E-04	-	9,71E+01	-	9,71E+01
7440020	Ni	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	2,0E-02	-	1,94E+04	-	1,94E+04
208968	Acénaphtylène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-04	-	4,25E+04	4,25E+04
83329	Acénaphtène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	6,0E-02	2,0E-04	5,82E+04	4,25E+04	4,25E+04
120127	Anthracène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,0E-01	2,0E-03	2,91E+05	4,25E+03	4,25E+03
56553	Benzo (a) anthracène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-02	-	4,25E+02	4,25E+02
50328	Benzo (a) pyrène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-01	-	4,25E+01	4,25E+01
205992	Benzo (b) fluoranthène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-02	-	4,25E+02	4,25E+02
191242	Benzo (ghi) pérylène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,0E-02	2,0E-03	2,91E+04	4,25E+03	4,25E+03
207089	Benzo (k) floranthène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-02	-	4,25E+02	4,25E+02
218019	Chrysène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-03	-	4,25E+03	4,25E+03
53703	Dibenzo (ah) anthracène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-01	-	4,25E+01	4,25E+01
206440	Fluoranthène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	4,0E-02	2,0E-04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04
86737	Fluorène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	4,0E-02	2,0E-04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04
193395	Indéno pyrène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	-	2,0E-02	-	4,25E+02	4,25E+02
91203	Naphtalène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	2,0E-02	2,0E-04	1,94E+04	4,25E+04	1,94E+04
85018	Phénanthrène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	4,0E-02	2,0E-04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04
129000	Pyrène	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	3,0E-02	2,0E-04	2,91E+04	4,25E+04	2,91E+04
1336363	PCB	0,2	1,00E-06	1,00E-04	47	40	6,25E+01	2,0E-05	2,0E+00	1,94E+01	4,25E+00	4,25E+00

Les tableaux suivants présentent les résultats des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges.

Tableau 98 : Scénario alignement – Promeneurs adultes – Calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Alignement

Promeneur adulte

		Echantillons TA/CO			Echantillons BR/CO			Echantillons BA/DR/CO			Echantillons TA/BA/BS			Echantillons TA/BE/DV		
n° CAS	Eléments	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé
		mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-
7440360	Sb	3,90E+00	1,56E-03	-	7,00E+00	2,80E-03	-	1,50E+01	6,00E-03	-	4,20E+00	1,68E-03	-	2,10E+00	8,40E-04	-
7440393	Ba	4,75E+02	3,80E-04	-	3,27E+02	2,62E-04	-	2,88E+02	2,30E-04	-	3,39E+02	2,71E-04	-	5,03E+02	4,02E-04	-
7439987	Mo	1,40E+00	4,48E-05	-	4,20E+00	1,34E-04	-	3,70E+00	1,18E-04	-	2,30E+00	7,36E-05	-	9,00E-01	2,88E-05	-
7440315	Sn	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-
7782492	Se	5,00E-01	1,60E-05	-	5,00E-01	1,60E-05	-	5,00E-01	1,60E-05	-	5,00E-01	1,60E-05	-	5,00E-01	1,60E-05	-
7439921	Pb	2,40E+01	1,07E-03	1,40E-08	4,60E+01	2,04E-03	2,68E-08	4,00E+01	1,78E-03	2,33E-08	1,80E+01	8,00E-04	1,05E-08	2,00E+01	8,89E-04	1,17E-08
7440666	Zn	1,12E+02	5,97E-05	-	3,19E+02	1,70E-04	-	2,57E+02	1,37E-04	-	1,19E+02	6,35E-05	-	5,90E+01	3,15E-05	-
18540299	Cr (+VI)	4,80E+01	2,56E-03	1,38E-06	4,00E+01	2,13E-03	1,15E-06	5,60E+01	2,99E-03	1,61E-06	7,90E+01	4,21E-03	2,28E-06	4,00E+01	2,13E-03	1,15E-06
16065831	Cr (+III)	4,80E+01	5,12E-06	-	4,00E+01	4,27E-06	-	5,60E+01	5,97E-06	-	7,90E+01	8,43E-06	-	4,00E+01	4,27E-06	-
7440508	Cu	4,40E+01	5,03E-05	-	1,34E+02	1,53E-04	-	1,24E+02	1,42E-04	-	6,30E+01	7,20E-05	-	3,50E+01	4,00E-05	-
7440439	Cd	2,00E-01	6,40E-05	-	5,00E-01	1,60E-04	-	3,00E-01	9,60E-05	-	2,00E-01	6,40E-05	-	5,00E-02	1,60E-05	-
7440382	As	1,50E+01	8,00E-03	1,54E-06	2,50E+01	1,33E-02	2,57E-06	1,50E+01	8,00E-03	1,54E-06	1,50E+01	8,00E-03	1,54E-06	1,20E+01	6,40E-03	1,23E-06
7439976	Hg inorganique/élémentaire	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
115093 22967926	Hg organique	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
7440020	Ni	1,70E+01	1,36E-04	-	1,90E+01	1,52E-04	-	2,40E+01	1,92E-04	-	2,60E+01	2,08E-04	-	1,80E+01	1,44E-04	-
208968	Acénaphtylène	1,12E-01	-	1,53E-12	1,74E-01	-	2,38E-12	1,24E-01	-	1,70E-12	5,00E-02	-	6,86E-13	5,21E-02	-	7,14E-13
83329	Acénaphtène	5,00E-03	1,33E-08	6,86E-14	5,00E-03	1,33E-08	6,86E-14	2,96E-02	7,89E-08	4,06E-13	6,61E-02	1,76E-07	9,07E-13	1,57E-02	4,19E-08	2,15E-13
120127	Anthracène	7,25E-03	3,87E-09	9,94E-13	9,50E-03	5,07E-09	1,30E-12	5,90E-02	3,15E-08	8,09E-12	1,32E-01	7,02E-08	1,80E-11	3,52E-02	1,88E-08	4,83E-12
56553	Benzo (a) anthracène	3,85E-02	-	5,28E-11	5,20E-02	-	7,13E-11	4,32E-01	-	5,93E-10	9,90E-01	-	1,36E-09	1,11E-01	-	1,53E-10
50328	Benzo (a) pyrène	3,33E-02	-	4,56E-10	6,15E-02	-	8,43E-10	3,55E-01	-	4,87E-09	7,57E-01	-	1,04E-08	1,51E-01	-	2,07E-09
205992	Benzo (b) fluoranthène	5,63E-02	-	7,71E-11	8,75E-02	-	1,20E-10	8,25E-01	-	1,13E-09	1,86E+00	-	2,55E-09	1,96E-01	-	2,68E-10
191242	Benzo (ghi) pérylène	3,08E-02	1,64E-07	4,22E-12	5,65E-02	3,01E-07	7,75E-12	2,05E-01	1,09E-06	2,81E-11	3,95E-01	2,10E-06	5,41E-11	1,13E-01	6,04E-07	1,55E-11
207089	Benzo (k) floranthène	2,05E-02	-	2,81E-11	3,60E-02	-	4,94E-11	3,61E-01	-	4,95E-10	8,16E-01	-	1,12E-09	8,55E-02	-	1,17E-10
218019	Chrysène	2,78E-02	-	3,81E-12	5,05E-02	-	6,93E-12	6,76E-01	-	9,27E-11	1,54E+00	-	2,11E-10	1,05E-01	-	1,44E-11
53703	Dibenzo (ah) anthracène	7,00E-03	-	9,60E-11	9,00E-03	-	1,23E-10	2,75E-02	-	3,77E-10	5,46E-02	-	7,49E-10	1,19E-02	-	1,64E-10
206440	Fluoranthène	7,28E-02	2,91E-07	9,98E-13	9,55E-02	3,82E-07	1,31E-12	1,77E+00	7,07E-06	2,43E-11	4,15E+00	1,66E-05	5,70E-11	2,35E-01	9,39E-07	3,22E-12
86737	Fluorène	3,13E-02	1,25E-07	4,29E-13	5,75E-02	2,30E-07	7,89E-13	7,19E-02	2,88E-07	9,86E-13	8,64E-02	3,46E-07	1,18E-12	2,81E-02	1,13E-07	3,86E-13
193395	Indéno pyrène	3,00E-02	-	4,11E-11	5,50E-02	-	7,54E-11	2,43E-01	-	3,34E-10	5,14E-01	-	7,04E-10	1,00E-01	-	1,38E-10
91203	Naphtalène	9,25E-03	7,40E-08	1,27E-13	1,35E-02	1,08E-07	1,85E-13	8,66E-02	6,93E-07	1,19E-12	1,94E-01	1,55E-06	2,66E-12	2,26E-02	1,81E-07	3,10E-13
85018	Phénanthrène	3,83E-02	1,53E-07	5,25E-13	7,15E-02	2,86E-07	9,81E-13	4,54E-01	1,81E-06	6,22E-12	9,54E-01	3,81E-06	1,31E-11	1,68E-01	6,73E-07	2,31E-12
129000	Pyrène	6,58E-02	3,51E-07	9,02E-13	8,15E-02	4,35E-07	1,12E-12	1,29E+00	6,88E-06	1,77E-11	3,07E+00	1,63E-05	4,20E-11	2,44E-01	1,30E-06	3,34E-12
1336363	PCB	4,90E-02	3,92E-04	6,72E-09	4,90E-02	3,92E-04	6,72E-09	5,53E-02	4,42E-04	7,58E-09	6,45E-02	5,16E-04	8,85E-09	4,90E-02	3,92E-04	6,72E-09
		Σ	**1,43E-02**	**2,95E-06**	**Σ**	**2,18E-02**	**3,76E-06**	**Σ**	**2,02E-02**	**3,19E-06**	**Σ**	**1,60E-02**	**3,85E-06**	**Σ**	**1,13E-02**	**2,41E-06**

Tableau 99 : Scénario alignement – Promeneurs enfants - Chargé d'entretien – Calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Alignement

Promeneur enfant

		Echantillons TA/CO			Echantillons BR/CO			Echantillons BA/DR/CO			Echantillons TA/BA/BS			Echantillons TA/BE/DV		
n° CAS	Eléments	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé
		mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-
7440360	Sb	3,90E+00	1,80E-02	-	7,00E+00	3,23E-02	-	1,50E+01	6,92E-02	-	4,20E+00	1,94E-02	-	2,10E+00	9,69E-03	-
7440393	Ba	4,75E+02	4,38E-03	-	3,27E+02	3,02E-03	-	2,88E+02	2,66E-03	-	3,39E+02	3,13E-03	-	5,03E+02	4,64E-03	-
7439987	Mo	1,40E+00	5,17E-04	-	4,20E+00	1,55E-03	-	3,70E+00	1,37E-03	-	2,30E+00	8,49E-04	-	9,00E-01	3,32E-04	-
7440315	Sn	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-
7782492	Se	5,00E-01	1,85E-04	-	5,00E-01	1,85E-04	-	5,00E-01	1,85E-04	-	5,00E-01	1,85E-04	-	5,00E-01	1,85E-04	-
7439921	Pb	2,40E+01	1,23E-02	3,23E-08	4,60E+01	2,36E-02	6,19E-08	4,00E+01	2,05E-02	5,38E-08	1,80E+01	9,23E-03	2,42E-08	2,00E+01	1,03E-02	2,69E-08
7440666	Zn	1,12E+02	6,89E-04	-	3,19E+02	1,96E-03	-	2,57E+02	1,58E-03	-	1,19E+02	7,32E-04	-	5,90E+01	3,63E-04	-
18540299	Cr (+VI)	4,80E+01	2,95E-02	3,19E-06	4,00E+01	2,46E-02	2,66E-06	5,60E+01	3,45E-02	3,72E-06	7,90E+01	4,86E-02	5,25E-06	4,00E+01	2,46E-02	2,66E-06
16065831	Cr (+III)	4,80E+01	5,91E-05	-	4,00E+01	4,92E-05	-	5,60E+01	6,89E-05	-	7,90E+01	9,72E-05	-	4,00E+01	4,92E-05	-
7440508	Cu	4,40E+01	5,80E-04	-	1,34E+02	1,77E-03	-	1,24E+02	1,64E-03	-	6,30E+01	8,31E-04	-	3,50E+01	4,62E-04	-
7440439	Cd	2,00E-01	7,38E-04	-	5,00E-01	1,85E-03	-	3,00E-01	1,11E-03	-	2,00E-01	7,38E-04	-	5,00E-02	1,85E-04	-
7440382	As	1,50E+01	9,23E-02	3,56E-06	2,50E+01	1,54E-01	5,93E-06	1,50E+01	9,23E-02	3,56E-06	1,50E+01	9,23E-02	3,56E-06	1,20E+01	7,38E-02	2,85E-06
7439976	Hg inorganique/élémentaire	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
115093 22967926	Hg organique	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
7440020	Ni	1,70E+01	1,57E-03	-	1,90E+01	1,75E-03	-	2,40E+01	2,22E-03	-	2,60E+01	2,40E-03	-	1,80E+01	1,66E-03	-
208968	Acénaphtylène	1,12E-01	-	3,54E-12	1,74E-01	-	5,49E-12	1,24E-01	-	3,93E-12	5,00E-02	-	1,58E-12	5,21E-02	-	1,65E-12
83329	Acénaphtène	5,00E-03	1,54E-07	1,58E-13	5,00E-03	1,54E-07	1,58E-13	2,96E-02	9,11E-07	9,37E-13	6,61E-02	2,03E-06	2,09E-12	1,57E-02	4,83E-07	4,97E-13
120127	Anthracène	7,25E-03	4,46E-08	2,29E-12	9,50E-03	5,85E-08	3,01E-12	5,90E-02	3,63E-07	1,87E-11	1,32E-01	8,09E-07	4,16E-11	3,52E-02	2,17E-07	1,12E-11
56553	Benzo (a) anthracène	3,85E-02	-	1,22E-10	5,20E-02	-	1,65E-10	4,32E-01	-	1,37E-09	9,90E-01	-	3,13E-09	1,11E-01	-	3,53E-10
50328	Benzo (a) pyrène	3,33E-02	-	1,05E-09	6,15E-02	-	1,95E-09	3,55E-01	-	1,12E-08	7,57E-01	-	2,40E-08	1,51E-01	-	4,78E-09
205992	Benzo (b) fluoranthène	5,63E-02	-	1,78E-10	8,75E-02	-	2,77E-10	8,25E-01	-	2,61E-09	1,86E+00	-	5,89E-09	1,96E-01	-	6,19E-10
191242	Benzo (ghi) pérylène	3,08E-02	1,89E-06	9,73E-12	5,65E-02	3,48E-06	1,79E-11	2,05E-01	1,26E-05	6,48E-11	3,95E-01	2,43E-05	1,25E-10	1,13E-01	6,96E-06	3,58E-11
207089	Benzo (k) floranthène	2,05E-02	-	6,49E-11	3,60E-02	-	1,14E-10	3,61E-01	-	1,14E-09	8,16E-01	-	2,58E-09	8,55E-02	-	2,71E-10
218019	Chrysène	2,78E-02	-	8,78E-12	5,05E-02	-	1,60E-11	6,76E-01	-	2,14E-10	1,54E+00	-	4,86E-10	1,05E-01	-	3,33E-11
53703	Dibenzo (ah) anthracène	7,00E-03	-	2,22E-10	9,00E-03	-	2,85E-10	2,75E-02	-	8,70E-10	5,46E-02	-	1,73E-09	1,19E-02	-	3,78E-10
206440	Fluoranthène	7,28E-02	3,36E-06	2,30E-12	9,55E-02	4,41E-06	3,02E-12	1,77E+00	8,16E-05	5,60E-11	4,15E+00	1,92E-04	1,31E-10	2,35E-01	1,08E-05	7,43E-12
86737	Fluorène	3,13E-02	1,44E-06	9,89E-13	5,75E-02	2,65E-06	1,82E-12	7,19E-02	3,32E-06	2,28E-12	8,64E-02	3,99E-06	2,73E-12	2,81E-02	1,30E-06	8,90E-13
193395	Indéno pyrène	3,00E-02	-	9,49E-11	5,50E-02	-	1,74E-10	2,43E-01	-	7,70E-10	5,14E-01	-	1,63E-09	1,00E-01	-	3,18E-10
91203	Naphtalène	9,25E-03	8,54E-07	2,93E-13	1,35E-02	1,25E-06	4,27E-13	8,66E-02	7,99E-06	2,74E-12	1,94E-01	1,79E-05	6,13E-12	2,26E-02	2,09E-06	7,17E-13
85018	Phénanthrène	3,83E-02	1,77E-06	1,21E-12	7,15E-02	3,30E-06	2,26E-12	4,54E-01	2,09E-05	1,44E-11	9,54E-01	4,40E-05	3,02E-11	1,68E-01	7,76E-06	5,32E-12
129000	Pyrène	6,58E-02	4,05E-06	2,08E-12	8,15E-02	5,02E-06	2,58E-12	1,29E+00	7,94E-05	4,08E-11	3,07E+00	1,89E-04	9,70E-11	2,44E-01	1,50E-05	7,71E-12
1336363	PCB	4,90E-02	4,52E-03	1,55E-08	4,90E-02	4,52E-03	1,55E-08	5,53E-02	5,10E-03	1,75E-08	6,45E-02	5,96E-03	2,04E-08	4,90E-02	4,52E-03	1,55E-08
		Σ	**1,65E-01**	**6,80E-06**	**Σ**	**2,51E-01**	**8,67E-06**	**Σ**	**2,33E-01**	**7,37E-06**	**Σ**	**1,85E-01**	**8,90E-06**	**Σ**	**1,31E-01**	**5,56E-06**

Tableau 100 : Scénario alignement – Chargé d'entretien – Calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Alignement

Chargé d'entretien

		Echantillons TA/CO			Echantillons BR/CO			Echantillons BA/DR/CO			Echantillons TA/BA/BS			Echantillons TA/BE/DV		
n° CAS	Eléments	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé	Concentrations échantillons	QD calculé	ERI calculé
		mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-	mg/kg	-	-
7440360	Sb	3,90E+00	2,01E-03	-	7,00E+00	3,61E-03	-	1,50E+01	7,73E-03	-	4,20E+00	2,16E-03	-	2,10E+00	1,08E-03	-
7440393	Ba	4,75E+02	4,89E-04	-	3,27E+02	3,37E-04	-	2,88E+02	2,97E-04	-	3,39E+02	3,49E-04	-	5,03E+02	5,18E-04	-
7439987	Mo	1,40E+00	5,77E-05	-	4,20E+00	1,73E-04	-	3,70E+00	1,52E-04	-	2,30E+00	9,48E-05	-	9,00E-01	3,71E-05	-
7440315	Sn	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-
7782492	Se	5,00E-01	2,06E-05	-	5,00E-01	2,06E-05	-	5,00E-01	2,06E-05	-	5,00E-01	2,06E-05	-	5,00E-01	2,06E-05	-
7439921	Pb	2,40E+01	1,37E-03	2,40E-08	4,60E+01	2,63E-03	4,60E-08	4,00E+01	2,29E-03	4,00E-08	1,80E+01	1,03E-03	1,80E-08	2,00E+01	1,14E-03	2,00E-08
7440666	Zn	1,12E+02	7,69E-05	-	3,19E+02	2,19E-04	-	2,57E+02	1,76E-04	-	1,19E+02	8,17E-05	-	5,90E+01	4,05E-05	-
18540299	Cr (+VI)	4,80E+01	3,30E-03	2,37E-06	4,00E+01	2,75E-03	1,98E-06	5,60E+01	3,85E-03	2,77E-06	7,90E+01	5,43E-03	3,91E-06	4,00E+01	2,75E-03	1,98E-06
16065831	Cr (+III)	4,80E+01	6,59E-06	-	4,00E+01	5,49E-06	-	5,60E+01	7,69E-06	-	7,90E+01	1,09E-05	-	4,00E+01	5,49E-06	-
7440508	Cu	4,40E+01	6,48E-05	-	1,34E+02	1,97E-04	-	1,24E+02	1,82E-04	-	6,30E+01	9,27E-05	-	3,50E+01	5,15E-05	-
7440439	Cd	2,00E-01	8,24E-05	-	5,00E-01	2,06E-04	-	3,00E-01	1,24E-04	-	2,00E-01	8,24E-05	-	5,00E-02	2,06E-05	-
7440382	As	1,50E+01	1,03E-02	2,65E-06	2,50E+01	1,72E-02	4,41E-06	1,50E+01	1,03E-02	2,65E-06	1,50E+01	1,03E-02	2,65E-06	1,20E+01	8,24E-03	2,12E-06
7439976	Hg inorganique/élémentaire	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
115093 22967926	Hg organique	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-
7440020	Ni	1,70E+01	1,75E-04	-	1,90E+01	1,96E-04	-	2,40E+01	2,47E-04	-	2,60E+01	2,68E-04	-	1,80E+01	1,85E-04	-
208968	Acénaphtylène	1,12E-01	-	2,63E-12	1,74E-01	-	4,09E-12	1,24E-01	-	2,92E-12	5,00E-02	-	1,18E-12	5,21E-02	-	1,23E-12
83329	Acénaphtène	5,00E-03	1,72E-08	1,18E-13	5,00E-03	1,72E-08	1,18E-13	2,96E-02	1,02E-07	6,97E-13	6,61E-02	2,27E-07	1,56E-12	1,57E-02	5,39E-08	3,70E-13
120127	Anthracène	7,25E-03	4,98E-09	1,71E-12	9,50E-03	6,52E-09	2,24E-12	5,90E-02	4,05E-08	1,39E-11	1,32E-01	9,03E-08	3,10E-11	3,52E-02	2,42E-08	8,30E-12
56553	Benzo (a) anthracène	3,85E-02	-	9,07E-11	5,20E-02	-	1,22E-10	4,32E-01	-	1,02E-09	9,90E-01	-	2,33E-09	1,11E-01	-	2,62E-10
50328	Benzo (a) pyrène	3,33E-02	-	7,83E-10	6,15E-02	-	1,45E-09	3,55E-01	-	8,36E-09	7,57E-01	-	1,78E-08	1,51E-01	-	3,56E-09
205992	Benzo (b) fluoranthène	5,63E-02	-	1,32E-10	8,75E-02	-	2,06E-10	8,25E-01	-	1,94E-09	1,86E+00	-	4,38E-09	1,96E-01	-	4,61E-10
191242	Benzo (ghi) pérylène	3,08E-02	2,11E-07	7,24E-12	5,65E-02	3,88E-07	1,33E-11	2,05E-01	1,41E-06	4,82E-11	3,95E-01	2,71E-06	9,29E-11	1,13E-01	7,77E-07	2,66E-11
207089	Benzo (k) floranthène	2,05E-02	-	4,83E-11	3,60E-02	-	8,48E-11	3,61E-01	-	8,49E-10	8,16E-01	-	1,92E-09	8,55E-02	-	2,01E-10
218019	Chrysène	2,78E-02	-	6,53E-12	5,05E-02	-	1,19E-11	6,76E-01	-	1,59E-10	1,54E+00	-	3,61E-10	1,05E-01	-	2,48E-11
53703	Dibenzo (ah) anthracène	7,00E-03	-	1,65E-10	9,00E-03	-	2,12E-10	2,75E-02	-	6,48E-10	5,46E-02	-	1,29E-09	1,19E-02	-	2,81E-10
206440	Fluoranthène	7,28E-02	3,75E-07	1,71E-12	9,55E-02	4,92E-07	2,25E-12	1,77E+00	9,11E-06	4,16E-11	4,15E+00	2,14E-05	9,78E-11	2,35E-01	1,21E-06	5,53E-12
86737	Fluorène	3,13E-02	1,61E-07	7,36E-13	5,75E-02	2,96E-07	1,35E-12	7,19E-02	3,70E-07	1,69E-12	8,64E-02	4,45E-07	2,03E-12	2,81E-02	1,45E-07	6,62E-13
193395	Indéno pyrène	3,00E-02	-	7,06E-11	5,50E-02	-	1,30E-10	2,43E-01	-	5,73E-10	5,14E-01	-	1,21E-09	1,00E-01	-	2,37E-10
91203	Naphtalène	9,25E-03	9,53E-08	2,18E-13	1,35E-02	1,39E-07	3,18E-13	8,66E-02	8,92E-07	2,04E-12	1,94E-01	2,00E-06	4,56E-12	2,26E-02	2,33E-07	5,33E-13
85018	Phénanthrène	3,83E-02	1,97E-07	9,01E-13	7,15E-02	3,68E-07	1,68E-12	4,54E-01	2,34E-06	1,07E-11	9,54E-01	4,91E-06	2,25E-11	1,68E-01	8,66E-07	3,96E-12
129000	Pyrène	6,58E-02	4,52E-07	1,55E-12	8,15E-02	5,60E-07	1,92E-12	1,29E+00	8,86E-06	3,04E-11	3,07E+00	2,10E-05	7,22E-11	2,44E-01	1,67E-06	5,74E-12
1336363	PCB	4,90E-02	5,05E-04	1,15E-08	4,90E-02	5,05E-04	1,15E-08	5,53E-02	5,70E-04	1,30E-08	6,45E-02	6,65E-04	1,52E-08	4,90E-02	5,05E-04	1,15E-08
		Σ	**1,85E-02**	**5,06E-06**	**Σ**	**2,80E-02**	**6,45E-06**	**Σ**	**2,60E-02**	**5,48E-06**	**Σ**	**2,06E-02**	**6,62E-06**	**Σ**	**1,46E-02**	**4,13E-06**

Les tableaux suivants présentent les résumés des résultats des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges.

Tableau 101 : Scénario alignement – Promeneurs adultes – Résumé des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Alignement

Promeneur adulte		**Echantillons TA/CO**		**Echantillons BR/CO**		**Echantillons BA/DR/CO**		**Echantillons TA/BA/BS**		**Echantillons TA/BE/DV**	
n° CAS	Eléments	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7440360	Sb	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440393	Ba	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7439987	Mo	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440315	Sn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7782492	Se	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7439921	Pb	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
7440666	Zn	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
18540299	Cr (+VI)	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON
16065831	Cr (+III)	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440508	Cu	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440439	Cd	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440382	As	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON
7439976	Hg inorganique/élémentaire	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
115093 22967926	Hg organique	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440020	Ni	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
208968	Acénaphtylène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
83329	Acénaphtène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
120127	Anthracène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
56553	Benzo (a) anthracène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
50328	Benzo (a) pyrène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
205992	Benzo (b) fluoranthène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
191242	Benzo (ghi) pérylène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
207089	Benzo (k) floranthène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
218019	Chrysène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
53703	Dibenzo (ah) anthracène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
206440	Fluoranthène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
86737	Fluorène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
193395	Indéno pyrène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
91203	Naphtalène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
85018	Phénanthrène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
129000	Pyrène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
1336363	PCB	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Tableau 102 : Scénario alignement – Promeneurs enfants – Résumé des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Alignement

Promeneur enfant		**Echantillons TA/CO**		**Echantillons BR/CO**		**Echantillons BA/DR/CO**		**Echantillons TA/BA/BS**		**Echantillons TA/BE/DV**	
n° CAS	Eléments	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé	QD calculé	ERI calculé
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7440360	Sb	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440393	Ba	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7439987	Mo	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440315	Sn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7782492	Se	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7439921	Pb	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
7440666	Zn	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
18540299	Cr (+VI)	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON
16065831	Cr (+III)	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440508	Cu	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440439	Cd	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440382	As	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON
7439976	Hg inorganique/élémentaire	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
115093 22967926	Hg organique	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440020	Ni	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
208968	Acénaphtylène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
83329	Acénaphtène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
120127	Anthracène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
56553	Benzo (a) anthracène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
50328	Benzo (a) pyrène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
205992	Benzo (b) fluoranthène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
191242	Benzo (ghi) pérylène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
207089	Benzo (k) floranthène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
218019	Chrysène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
53703	Dibenzo (ah) anthracène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
206440	Fluoranthène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
86737	Fluorène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
193395	Indéno pyrène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
91203	Naphtalène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
85018	Phénanthrène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
129000	Pyrène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
1336363	PCB	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Tableau 103 : Scénario alignement –- Chargé d'entretien – Résumé des calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Alignement Chargé d'entretien		Echantillons TA/CO		Echantillons BR/CO		Echantillons BA/DR/CO		Echantillons TA/BA/BS		Echantillons TA/BE/DV	
n° CAS	Eléments	QD calculé -	ERI calculé -	QD calculé -	ERI calculé -	QD calculé -	ERI calculé -	QD calculé -	ERI calculé -	QD calculé -	ERI calculé -
7440360	Sb	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440393	Ba	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7439987	Mo	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440315	Sn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7782492	Se	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7439921	Pb	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
7440666	Zn	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
18540299	Cr (+VI)	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON
16065831	Cr (+III)	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440508	Cu	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440439	Cd	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440382	As	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON	OK	NON
7439976	Hg inorganique/élémentaire	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
115093 22967926	Hg organique	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
7440020	Ni	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-
208968	Acénaphtylène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
83329	Acénaphtène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
120127	Anthracène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
56553	Benzo (a) anthracène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
50328	Benzo (a) pyrène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
205992	Benzo (b) fluoranthène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
191242	Benzo (ghi) pérylène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
207089	Benzo (k) floranthène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
218019	Chrysène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
53703	Dibenzo (ah) anthracène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
206440	Fluoranthène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
86737	Fluorène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
193395	Indéno pyrène	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK	-	OK
91203	Naphtalène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
85018	Phénanthrène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
129000	Pyrène	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
1336363	PCB	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Les tableaux suivants présentent les résumés des concentrations dépassant les valeurs limites en fonction des différents mélanges.

Tableau 104 : Scénario alignement –- Promeneurs adultes – Résumé des concentrations dépassant les valeurs limites suite aux calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Alignement Promeneur adulte		Echantillons TA/CO		Echantillons BR/CO		Echantillons BA/DR/CO		Echantillons TA/BA/BS		Echantillons TA/BE/DV	
n° CAS	Eléments	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg
7440360	Sb	4,96E+02	-	4,93E+02	-	4,85E+02	-	4,96E+02	-	4,98E+02	-
7440393	Ba	2,50E+05	-	2,50E+05	-	2,50E+05	-	2,50E+05	-	2,49E+05	-
7439987	Mo	6,25E+03	-	6,25E+03	-	6,25E+03	-	6,25E+03	-	6,25E+03	-
7440315	Sn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7782492	Se	6,25E+03	-	6,25E+03	-	6,25E+03	-	6,25E+03	-	6,25E+03	-
7439921	Pb	4,48E+03	1,69E+03	4,45E+03	1,67E+03	4,46E+03	1,68E+03	4,48E+03	1,70E+03	4,48E+03	1,70E+03
7440666	Zn	3,75E+05	-	3,75E+05	-	3,75E+05	-	3,75E+05	-	3,75E+05	-
18540299	Cr (+VI)	3,70E+03	-1,33E+01	3,71E+03	-5,28E+00	3,69E+03	-2,13E+01	3,67E+03	-4,43E+01	3,71E+03	-5,28E+00
16065831	Cr (+III)	1,87E+06	-	1,87E+06	-	1,87E+06	-	1,87E+06	-	1,87E+06	-
7440508	Cu	1,75E+05	-	1,75E+05	-	1,75E+05	-	1,75E+05	-	1,75E+05	-
7440439	Cd	6,25E+02	-	6,25E+02	-	6,25E+02	-	6,25E+02	-	6,25E+02	-
7440382	As	3,60E+02	-5,28E+00	3,50E+02	-1,53E+01	3,60E+02	-5,28E+00	3,60E+02	-5,28E+00	3,63E+02	-2,28E+00
7439976	Hg inorganique/élémentaire	3,75E+02	-	3,75E+02	-	3,75E+02	-	3,75E+02	-	3,75E+02	-
115093 22967926	Hg organique	1,25E+02	-	1,25E+02	-	1,25E+02	-	1,25E+02	-	1,25E+02	-
7440020	Ni	2,50E+04	-	2,50E+04	-	2,50E+04	-	2,50E+04	-	2,50E+04	-
208968	Acénaphtylène	-	7,29E+04	-	7,29E+04	-	7,29E+04	-	7,29E+04	-	7,29E+04
83329	Acénaphtène	7,50E+04	7,29E+04	7,50E+04	7,29E+04	7,50E+04	7,29E+04	7,50E+04	7,29E+04	7,50E+04	7,29E+04
120127	Anthracène	3,75E+05	7,29E+03	3,75E+05	7,29E+03	3,75E+05	7,29E+03	3,75E+05	7,29E+03	3,75E+05	7,29E+03
56553	Benzo (a) anthracène	-	7,29E+02	-	7,29E+02	-	7,29E+02	-	7,28E+02	-	7,29E+02
50328	Benzo (a) pyrène	-	7,29E+01	-	7,29E+01	-	7,26E+01	-	7,22E+01	-	7,28E+01
205992	Benzo (b) fluoranthène	-	7,29E+02	-	7,29E+02	-	7,28E+02	-	7,27E+02	-	7,29E+02
191242	Benzo (ghi) pérylène	3,75E+04	7,29E+03	3,75E+04	7,29E+03	3,75E+04	7,29E+03	3,75E+04	7,29E+03	3,75E+04	7,29E+03
207089	Benzo (k) floranthène	-	7,29E+02	-	7,29E+02	-	7,29E+02	-	7,28E+02	-	7,29E+02
218019	Chrysène	-	7,29E+03	-	7,29E+03	-	7,29E+03	-	7,29E+03	-	7,29E+03
53703	Dibenzo (ah) anthracène	-	7,29E+01	-	7,29E+01	-	7,29E+01	-	7,29E+01	-	7,29E+01
206440	Fluoranthène	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04	7,29E+04
86737	Fluorène	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04	7,29E+04
193395	Indéno pyrène	-	7,29E+02	-	7,29E+02	-	7,29E+02	-	7,29E+02	-	7,29E+02
91203	Naphtalène	2,50E+04	7,29E+04	2,50E+04	7,29E+04	2,50E+04	7,29E+04	2,50E+04	7,29E+04	2,50E+04	7,29E+04
85018	Phénanthrène	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04	7,29E+04	5,00E+04	7,29E+04
129000	Pyrène	3,75E+04	7,29E+04	3,75E+04	7,29E+04	3,75E+04	7,29E+04	3,75E+04	7,29E+04	3,75E+04	7,29E+04
1336363	PCB	2,50E+01	7,24E+00	2,50E+01	7,24E+00	2,49E+01	7,24E+00	2,49E+01	7,23E+00	2,50E+01	7,24E+00

Tableau 105 : Scénario alignement –- Promeneurs enfants – Résumé des concentrations dépassant les valeurs limites suite aux calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Alignement

Promeneur enfant		Echantillons TA/CO		Echantillons BR/CO		Echantillons BA/DR/CO		Echantillons TA/BA/BS		Echantillons TA/BE/DV	
n° CAS	Eléments	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg
7440360	Sb	3,94E+01	-	3,63E+01	-	2,83E+01	-	3,91E+01	-	4,12E+01	-
7440393	Ba	2,12E+04	-	2,13E+04	-	2,14E+04	-	2,13E+04	-	2,12E+04	-
7439987	Mo	5,40E+02	-	5,37E+02	-	5,38E+02	-	5,39E+02	-	5,41E+02	-
7440315	Sn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7782492	Se	5,41E+02	-	5,41E+02	-	5,41E+02	-	5,41E+02	-	5,41E+02	-
7439921	Pb	3,66E+02	7,19E+02	3,44E+02	6,97E+02	3,50E+02	7,03E+02	3,72E+02	7,25E+02	3,70E+02	7,23E+02
7440666	Zn	3,24E+04	-	3,22E+04	-	3,22E+04	-	3,24E+04	-	3,24E+04	-
18540299	Cr (+VI)	2,77E+02	-3,30E+01	2,85E+02	-2,50E+01	2,69E+02	-4,10E+01	2,46E+02	-6,40E+01	2,85E+02	-2,50E+01
16065831	Cr (+III)	1,62E+05	-	1,62E+05	-	1,62E+05	-	1,62E+05	-	1,62E+05	-
7440508	Cu	1,51E+04	-	1,50E+04	-	1,50E+04	-	1,51E+04	-	1,51E+04	-
7440439	Cd	5,40E+01	-	5,37E+01	-	5,39E+01	-	5,40E+01	-	5,41E+01	-
7440382	As	1,75E+01	-1,08E+01	7,50E+00	-2,08E+01	1,75E+01	-1,08E+01	1,75E+01	-1,08E+01	2,05E+01	-7,79E+00
7439976	Hg inorganique/élémentaire	3,25E+01	-	3,25E+01	-	3,25E+01	-	3,25E+01	-	3,25E+01	-
115093 22967926	Hg organique	1,08E+01	-	1,08E+01	-	1,08E+01	-	1,08E+01	-	1,08E+01	-
7440020	Ni	2,15E+03	-	2,15E+03	-	2,14E+03	-	2,14E+03	-	2,15E+03	-
208968	Acénaphtylène	-	3,16E+04	-	3,16E+04	-	3,16E+04	-	3,16E+04	-	3,16E+04
83329	Acénaphtène	6,50E+03	3,16E+04	6,50E+03	3,16E+04	6,50E+03	3,16E+04	6,50E+03	3,16E+04	6,50E+03	3,16E+04
120127	Anthracène	3,25E+04	3,16E+03	3,25E+04	3,16E+03	3,25E+04	3,16E+03	3,25E+04	3,16E+03	3,25E+04	3,16E+03
56553	Benzo (a) anthracène	-	3,16E+02	-	3,16E+02	-	3,16E+02	-	3,15E+02	-	3,16E+02
50328	Benzo (a) pyrène	-	3,16E+01	-	3,15E+01	-	3,12E+01	-	3,08E+01	-	3,14E+01
205992	Benzo (b) fluoranthène	-	3,16E+02	-	3,16E+02	-	3,15E+02	-	3,14E+02	-	3,16E+02
191242	Benzo (ghi) pérylène	3,25E+03	3,16E+03	3,25E+03	3,16E+03	3,25E+03	3,16E+03	3,25E+03	3,16E+03	3,25E+03	3,16E+03
207089	Benzo (k) floranthène	-	3,16E+02	-	3,16E+02	-	3,16E+02	-	3,15E+02	-	3,16E+02
218019	Chrysène	-	3,16E+03	-	3,16E+03	-	3,16E+03	-	3,16E+03	-	3,16E+03
53703	Dibenzo (ah) anthracène	-	3,16E+01	-	3,16E+01	-	3,16E+01	-	3,15E+01	-	3,16E+01
206440	Fluoranthène	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03	3,16E+04
86737	Fluorène	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03	3,16E+04
193395	Indéno pyrène	-	3,16E+02	-	3,16E+02	-	3,16E+02	-	3,15E+02	-	3,16E+02
91203	Naphtalène	2,17E+03	3,16E+04	2,17E+03	3,16E+04	2,17E+03	3,16E+04	2,17E+03	3,16E+04	2,17E+03	3,16E+04
85018	Phénanthrène	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03	3,16E+04	4,33E+03	3,16E+04
129000	Pyrène	3,25E+03	3,16E+04	3,25E+03	3,16E+04	3,25E+03	3,16E+04	3,25E+03	3,16E+04	3,25E+03	3,16E+04
1336363	PCB	2,12E+00	3,11E+00	2,12E+00	3,11E+00	2,11E+00	3,10E+00	2,10E+00	3,10E+00	2,12E+00	3,11E+00

Tableau 106 : Scénario alignement –- Chargé d'entretien – Résumé des concentrations dépassant les valeurs limites suite aux calculs des Quotients de Danger et des Excès de Risques Individuels en fonction des différents mélanges

Alignement

Chargé d'entretien		Echantillons TA/CO		Echantillons BR/CO		Echantillons BA/DR/CO		Echantillons TA/BA/BS		Echantillons TA/BE/DV	
n° CAS	Eléments	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour QD calculé mg/kg	Delta (Cmax-Canalysé) pour ERI calculé mg/kg
7440360	Sb	3,84E+02	-	3,81E+02	-	3,73E+02	-	3,84E+02	-	3,86E+02	-
7440393	Ba	1,94E+05	-	1,94E+05	-	1,94E+05	-	1,94E+05	-	1,94E+05	-
7439987	Mo	4,85E+03	-	4,85E+03	-	4,85E+03	-	4,85E+03	-	4,85E+03	-
7440315	Sn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7782492	Se	4,85E+03	-	4,85E+03	-	4,85E+03	-	4,85E+03	-	4,85E+03	-
7439921	Pb	3,47E+03	9,75E+02	3,45E+03	9,53E+02	3,45E+03	9,59E+02	3,48E+03	9,81E+02	3,47E+03	9,79E+02
7440666	Zn	2,91E+05	-	2,91E+05	-	2,91E+05	-	2,91E+05	-	2,91E+05	-
18540299	Cr (+VI)	2,86E+03	-2,78E+01	2,87E+03	-1,98E+01	2,86E+03	-3,58E+01	2,83E+03	-5,88E+01	2,87E+03	-1,98E+01
16065831	Cr (+III)	1,46E+06	-	1,46E+06	-	1,46E+06	-	1,46E+06	-	1,46E+06	-
7440508	Cu	1,36E+05	-	1,36E+05	-	1,36E+05	-	1,36E+05	-	1,36E+05	-
7440439	Cd	4,85E+02	-	4,85E+02	-	4,85E+02	-	4,85E+02	-	4,85E+02	-
7440382	As	2,76E+02	-9,34E+00	2,66E+02	-1,93E+01	2,76E+02	-9,34E+00	2,76E+02	-9,34E+00	2,79E+02	-6,34E+00
7439976	Hg inorganique/élémentaire	2,91E+02	-	2,91E+02	-	2,91E+02	-	2,91E+02	-	2,91E+02	-
115093 22967926	Hg organique	9,71E+01	-	9,71E+01	-	9,71E+01	-	9,71E+01	-	9,71E+01	-
7440020	Ni	1,94E+04	-	1,94E+04	-	1,94E+04	-	1,94E+04	-	1,94E+04	-
208968	Acénaphtylène	-	4,25E+04	-	4,25E+04	-	4,25E+04	-	4,25E+04	-	4,25E+04
83329	Acénaphtène	5,82E+04	4,25E+04	5,82E+04	4,25E+04	5,82E+04	4,25E+04	5,82E+04	4,25E+04	5,82E+04	4,25E+04
120127	Anthracène	2,91E+05	4,25E+03	2,91E+05	4,25E+03	2,91E+05	4,25E+03	2,91E+05	4,25E+03	2,91E+05	4,25E+03
56553	Benzo (a) anthracène	-	4,25E+02	-	4,25E+02	-	4,24E+02	-	4,24E+02	-	4,25E+02
50328	Benzo (a) pyrène	-	4,24E+01	-	4,24E+01	-	4,21E+01	-	4,17E+01	-	4,23E+01
205992	Benzo (b) fluoranthène	-	4,25E+02	-	4,25E+02	-	4,24E+02	-	4,23E+02	-	4,25E+02
191242	Benzo (ghi) pérylène	2,91E+04	4,25E+03	2,91E+04	4,25E+03	2,91E+04	4,25E+03	2,91E+04	4,25E+03	2,91E+04	4,25E+03
207089	Benzo (k) floranthène	-	4,25E+02	-	4,25E+02	-	4,24E+02	-	4,24E+02	-	4,25E+02
218019	Chrysène	-	4,25E+03	-	4,25E+03	-	4,25E+03	-	4,25E+03	-	4,25E+03
53703	Dibenzo (ah) anthracène	-	4,25E+01	-	4,25E+01	-	4,24E+01	-	4,24E+01	-	4,25E+01
206440	Fluoranthène	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04
86737	Fluorène	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04
193395	Indéno pyrène	-	4,25E+02	-	4,25E+02	-	4,24E+02	-	4,24E+02	-	4,25E+02
91203	Naphtalène	1,94E+04	4,25E+04	1,94E+04	4,25E+04	1,94E+04	4,25E+04	1,94E+04	4,25E+04	1,94E+04	4,25E+04
85018	Phénanthrène	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04	3,88E+04	4,25E+04
129000	Pyrène	2,91E+04	4,25E+04	2,91E+04	4,25E+04	2,91E+04	4,25E+04	2,91E+04	4,25E+04	2,91E+04	4,25E+04

VII.4.c. Conclusion relatives aux évaluations des risques sanitaires

Les calculs de risques sanitaires, basés sur des hypothèses majorantes, mettent en lumière une non-compatibilité entre les matériaux apportés et les usages (square et alignement).

Cette non compatibilité repose sur des calculs de risques dépassant légèrement les concentrations maximales admissibles pour le Cr, l'As et Sb, parmi l'ensemble des éléments pris en considération.

Les dépassements en chrome sont relevés pour les 5 mélanges, et sont essentiellement dus au fait qu'en absence de spéciation, il a été considéré que l'intégralité du Cr était sous sa forme la plus toxique (Cr+VI). En ce qui concerne l'arsenic, relevé également pour l'ensemble des 5 mélanges, il a aussi été considéré que l'As était présent sous sa forme la plus toxique.
Le dépassement en antimoine n'est relevé que sur un seul des cinq mélange, à savoir BA/DR/CO (ballast, déchets de balayage de rues, compost).

Notons que les Concentrations Maximales Admissibles (CMA) doivent être pondérés par le fond géochimique afin de valider/infirmer les concentrations.

VII.5. Analyse et proposition d'un outil d'analyse multicritères

L'outil d'Analyse Multi-Critère (AMC) a pour objectif de faciliter le choix d'un technosol construit en prenant des contraintes techniques, économiques et sociétales. C'est la multiplication des dimensions à prendre en compte et la complexité qu'elles génèrent pour effectuer un choix de mélange de matériaux qui a motivé l'élaboration d'un tel outil.
A partir de données d'entrées de type techniques (disponibilité de matériaux, caractérisation de matériaux), de type économiques (prix des matériaux, prix des déterminants de coûts de transports) et de types sociétales (acceptabilité) et en réponse à une attente donnée (usage du sol), l'outil fournit une vision simplifiée des avantages et des inconvénients des mélanges de matériaux disponibles à l'attention du décideur.
Pour ce faire, à partir des paramètres décrits ci-dessus, l'outil opère plusieurs traitements. Le traitement technique qui a pour objectif de passer des caractéristiques des matériaux aux caractéristiques des mélanges de matériaux. Le traitement économique qui a pour objectif d'estimer les coûts de créations de mélanges (notamment en prenant en compte les coûts de transports) et en incluant les externalités négatives telles que les émissions de CO2. Le traitement sociétal qui, à partir d'une note d'acceptabilité pour un matériau (qui est la résultante des Focus Group, voir volet analyse sociétale), attribue une note pour chaque mélange.
Le schéma suivant explicite les flux et les traitements des données opérées par l'outil.

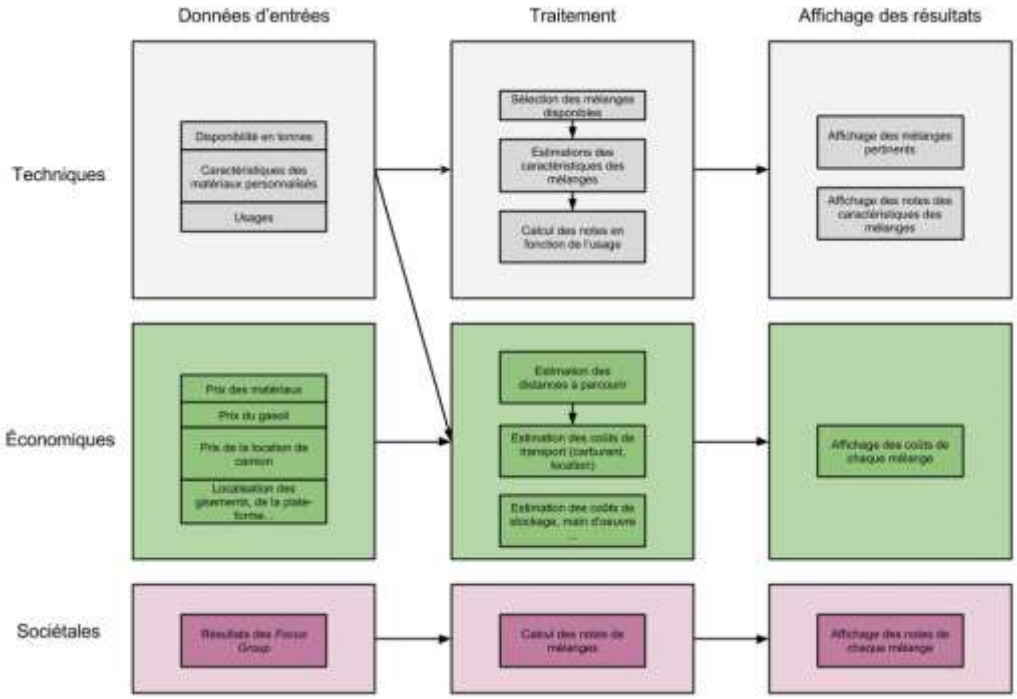


Figure 135 : Flux et traitement de données opérés par l'outil

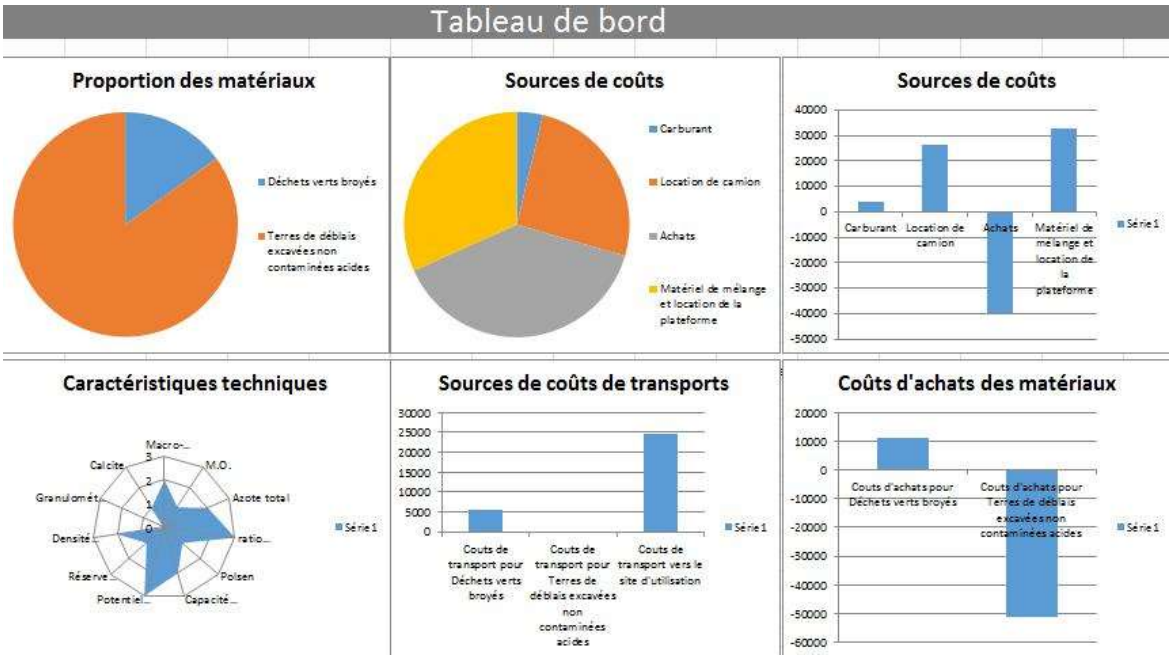


Figure 136 : Exemple de résultats de l'outil pour un mélange

L'outil dans sa forme actuelle est un prototype qui fonctionne et propose une liste hiérarchisée de mélanges pertinents à l'utilisateur afin de lui simplifier l'opération de choix du mélange à réaliser en réponse à un usage spécifié. Cet outil nécessite d'évoluer de deux manières pour devenir un modèle plus robuste et pleinement opérationnel. Sur le fond, le traitement des données techniques reste simple en proposant des estimations de caractéristiques de mélanges issus de calculs de proportions. Des marges d'erreurs conséquentes (difficiles à estimer) sont à prévoir avec les formules actuellement implémentées. La forme de l'outil (un fichier Excel avec du code Visual Basic) le rend difficilement diffusable en raison d'une faible résilience aux modifications éventuelles et accidentelles de l'utilisateur. Le respect de la protection de la propriété intellectuelle est également très difficile à faire respecter une fois le fichier diffusé et constitue un autre point de difficulté à sa diffusion. D'autres formes, telles que le logiciel ou l'application web, sont à considérer pour d'éventuelles poursuites de développement de cet outil d'aide à la décision, en appui de la filière SITERRE.

VIII. Références bibliographiques

ADEME, 2009. Guide méthodologique pour la sélection des techniques et l'évaluation de leurs performances – Traitabilité des sols pollués. Cahier des charges. Rapport ADEME.

AFNOR, 1992. NF P 11-300 – Exécution des terrassements – Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

AFNOR, 1998. NF P 94-068 – Sols : Reconnaissance et essais – Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux.

AFNOR, 2006. – XP CEN/TS 15364 – Caractérisation des déchets – Essais de comportement à la lixiviation – Essai de capacité de neutralisation acide et basique.

Association des Maires de France, et ACONSULT. 2007. Le maire et les boues d'épuration, Guide pratique pour les collectivités locales. AMF.
http://www.amf.asso.fr/upload/fichiers/documents/AMF_20070313_Guide_des_boues1.pdf.

Association pour la relance agronomique en Alsace, 2007. De bout en bou(es). Association pour la relance agronomique en Alsace édition. Nov 2007
http://www.smra68.net/z_pdf/taboue-story/pdf-taboue-mag-de-bou-en-boues/magazine-tabou-story-13.pdf.

Barbier, Rémi, et Sylvie Lupton. 2003. Jeux et enjeux autour de la réglementation des épandages. Dossier de l'environnement INRA, n° 25: 139‑48.

Barles, Sabine. 2005. L'invention des déchets urbains: France (1790-1970). Editions Champ Vallon.

Bayuseno, A.P., Schmahl, W.W., 2011. Characterization of MSWI fly ash through mineralogy and water extraction. Resources, Conservation and Recycling 55: 524–534.

Benzaazoua, M., Marion, P., Picquet, I., Bussière, B., 2004. The use of pastefill as a solidification and stabilization process for the control of acid mine drainage. Minerals Engineering, 17: 233-243.

Blanc, P, Lassin, A, Piantone, P, 2007. Thermoddem: a database devoted to waste minerals. BRGM, Orléans, France. http://thermoddem.brgm.fr

Bruand A, Duval O, Gaillard H, Darthout R, Jamagne M, 1996. Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. Etude et Gestion des Sols 7(1): 7-24.

Callot, G., Dupuis, M., 1980. Le calcaire actif des sols et sa signification. Bull. AFES, 17-26.

Costanza, R., 2008. Ecosystem services: multiple classification systems are needed: Biological Conservation, v. 141, p. 350-352.

Coquet Y, Boucher A, Labat C, Vachier P, Roger-Estrade J, 2000. Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques. Aspects théoriques et pratiques Etude et Gestion des Sols 3(1): 27-40.

Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine, 2008. Programme régional d'études sur le compostage des boues. Expertise du compostage de boues en Lorraine : état des lieux, qualité des produits, débouchés et synthèse de fonctionnement de la filière.
http://cra-lorraine.fr/fichiers/rapport_programme_regional_etudes_compostage_boues_mars_2012.pdf.

Denise Jodelet, 1989. Les Représentations sociales. Sociologie d'aujourd'hui. Paris Presses universitaires de France.

Duval L., 1963. Etude des conditions de validité du dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique. Conséquences pratiques. Chim. Anal. , 45, 237-250.

ECRIN, 2000. Une approche socio-économique du Club Environnement & Société. Les Cahiers des Clubs CRIN, décembre.

Epandage agricole des boues d'épuration : le système d'indemnisation précisé, 2015. *Actu-Environnement*. Consulté le juillet 15. http://www.actu-environnement.com/ae/news/systeme_indemnisation_epandage_agricole_boues_epuration_7443.php4.

Guyon, E & Troadec J.P, 1994. Du sac de billes au tas de sable. Odile Jacob, Paris.

Grosbellet C., 2009. Evolution et effets sur la structuration du sol de la matière organique apportée en grande quantité, Mémoire de Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques, 239p.

Humez, N., Prost, R., 1999. A new experimental approach to study the long term behaviour of solidified/stabilized wastes. Chemical Speciation and Bioavailability, 11(1): 1-24.

Jeanjean, Agnès, 2000. Basses Oeuvres. Ethnologie d'un réseau technique urbain : les égouts de Montpellier. » *Annuaire des collectivités locales* 20 (1): 633‑40. doi:10.3406/coloc.2000.1636.

Jeanroy, E., 1983. Diagnostic des formes du fer dans les pédogénèses tempérées. Thèse, Université Nancy, 47-49.

Joncoux, Steve, 2013. Les "produits résiduaires organiques" pour une intensification écologique de l'agriculture : ressources, déchets ou produits ? : sociologie des formats de valorisation agricole. Phdthesis, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00989973/document.

Khakhar, D.V., 2011. Rheology and Mixing of Granular Materials. Macromolecular Materials and Engineering, 296(3‑4): 278‑289.

Le Guen, Roger, Bertille Morel, et Annie Sigwalt, 2003. L'acceptabilité sociale des épandages agricoles de boues de stations d'épuration urbaines en régions Bretagne et Pays de la Loire. Ecole supérieure d'agriculture d'Angers. http://www.vintagemaster.com/IMG/pdf/boues.pdf.

Lolive, Jacques, 2004. Configurations, prises et propositions. Les Annales de la Recherche Urbaine, n° 95: 7‑15.

Lupton, Sylvie, 2001. Sécurité environnementale et sanitaire : les biens controversés. Économie rurale 262 (1): 3‑18. doi:10.3406/ecoru.2001.5228.

Mehra, O.P., Jackson, M.L., 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Clays Clay Miner., 7, 317-327.

Metson, A.J., 1956. Methods of chemical analysis for soil survey samples. NZ Soil Bur Bull n°12.

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, direction de l'eau et de la biodiversité. 2009. Eléments de contexte et réglementation française relatifs à la valorisation des boues issues du traitement des eaux usées. » http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_-_090504_lpdi_boue_synthese_internet_francais_v1.pdf.

Nicourt, Christian, et Jean-Max Girault, 2003. Qualification de déchets des boues de stations d'épuration et réorganisation de la filière dans deux départements marqués par le moteur urbain, Dossier de l'environnement INRA, , n° 25: 125‑38.

Olsen, S.R. and al., 1954. Estimation of available phosphorous in soils by extraction with sodium bicarbonate. Cir. U.S. Dep. Agr ., n° 939, 1-19.

Pansu, M., Gautheyrou, J., 2006. Mineralogical Separation by Selective Dissolution. In Handbook of soil analysis. Mineralogical, Organic and Inorganic Methods. Springer, 167-219.

Randall, S.R., Sherman, D.M. and Ragnarsdottir, K.V., 2001. Sorption of As(V) on green rust (Fe4(II)Fe2(III)(OH)12SO4 • 3H2O) and lepidocrocite ([gamma]-FeOOH): Surface complexes from EXAFS spectroscopy. Geochimica et Cosmochimica Acta, 65(7): 1015- 1023.
Severson, B.L., Snurr, R.Q. & Ottino, J.M., 2007. Granular mixtures: Analogy with chemical solution thermodynamics. The Journal of Chemical Physics, 127, p.174902.

Séré G., 2007, Fonctionnement et évolution pédogénétique de Technosols issus d'un procédé de construction de sol, Mémoire de Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques, 227p.

SETRA, 1992. Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme, Paris, LCPC, SETRA.

TEEB, 2011. Manual for cities: Ecosystem Services in Urban Management, *in* A. Berghöfer, ed., James Blignaut, Martin de Wit, Hugo van Zyl.

Uzarowicz, L, Skiba S., 2011. Technogenic soils developed on mine spoils containing iron sulphides: Mineral transformations as an indicator of pedogenesis. Geoderma 163, 95-108.

Waychunas, G.A., Davis, J.A. and Fuller, C.C., 1995. Geometry of sorbed arsenate on ferrihydrite and crystalline FeOOH: Re-evaluation of EXAFS results and topological factors in predicting sorbate geometry, and evidence for monodentate complexes. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(17): 3655-3661.

IX. Liste des communications et articles dans le cadre du programme SITERRE (jusque novembre 2015)

Communications orales à des colloques, congrès, séminaires

Müller F., Damas, O., Feix I. - Siterre (Procédé de construction de Sols à partir de matériaux Innovants en substitution à la TERRE végétale et aux granulats de carrière). *Les 6èmes rencontres du végétal*, 10-11 janvier 2011, Angers, France.

Damas O. - Présentation du projet Siterre. *Conseil d'administration de Plante & Cité*, septembre 2011.

Damas O. - Présentation du projet Siterre. *Conseil scientifique de Plante & Cité*, novembre 2011.

Damas O. - Projet Siterre. Fertilité des sols urbains. *Les rendez-vous de l'école du Breuil* (ville de Paris, CNFPT, Palais de la Découverte), 5 avril 2012, Paris, France.

Damas O. - Projet Siterre. Comité de pilotage technique de Plante & Cité, 16 octobre 2012.

Schwartz C., Cortet J., Laurent F., Morel J.-L., Séré G., Guimont S., Renat J.-C., Bataillard P., Guerin V., Damas, O., Simonnot M.-O. - La refonctionnalisation écologique des sols par la revégétalisation : une autre manière d'utiliser le végétal. *Journée technique nationale ADEME « Phytotechnologies appliquées aux sites pollués»*, 17 octobre 2012. Paris, France.

Damas O. - Présentation du projet Siterre. *Conseil scientifique de Plante & Cité*, 6 novembre 2012.

Damas O. - Table ronde. Formation de la Fédération Française du Paysage (Sud-Ouest), Centre de Formation des Architectes sur le thème des sols, 26 avril 2013.

Damas O. - Présentation du projet Siterre. *Conseil scientifique de Plante & Cité*, 14 novembre 2013.

Nehls T. - Diffusion of phosphorus from technogenic materials to plant roots. *The 7th International conference of Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and military Areas*, 16-20 September 2013, Torun, Poland.

Rokia S., Séré G., Deeb M., Fournier F., Nehls T., Damas O., Vidal-Beaudet L., Schwartz C. – Fertility of Technosols constructed with urban wastes. *European Geosciences Union*, 27 avril – 2 mai 2014, Vienna, Austria.

Vidal-Beaudet L. - Projet Siterre. Séquence « Nature en ville et sols urbains ». *Colloque Natureparif « Quelle nature en ville? »* – 4 juin 2014.

Vidal-Beaudet L. - Projet Siterre, *Séminaire plénier de l'IRSTV*, 24 juin 2014.

Damas O. - Projet Siterre. *Journée technique « de la reconversion à la refonctionnalisation des sols »*, Pôle de compétitivité Axelera, 16 septembre 2014.

Cannavo P. - Propriétés hydrodynamiques des sols construits à partir de déchets et aptitude des arbres à s'y développer, *39èmes Journées Scientifiques du Groupe Francophone Humidimétrie et traNsferts en milieux poreux*, 25-26 novembre 2014, Angers, France.

Vidal-Beaudet L. - Fertilité physique des sols urbains, 39èmes Journées Scientifiques du Groupe Francophone Humidimétrie et traNsferts en milieux poreux, 25-26 novembre 2014, Angers, France.

Guimont S. - Construire des sols urbains en réutilisant les déchets de la Cité. *Réunion du club Urbanisme, Bâti et Biodiversité*, 18 mars 2015.

Damas O. - Présentation du projet Siterre. *Comité de pilotage technique de Plante & Cité*, 29 avril 2015.

Canavo P. - Construction de sols végétalisés à partir de déchets afin de préserver la ressource naturelle «sol », Carrefour de l'Innovation Agronomique, INRA-Agrocampus Ouest, *Ville à haute intensité écologique : la place du végétal*, 30 septembre 2015, Angers.

Damas O. - Présentation du projet Siterre. *Conseil d'administration de Plante & Cité*, 8 octobre 2015.

Damas O. - Présentation du projet Siterre. *Conseil scientifique de Plante & Cité*, 4 novembre 2015.

Séré, G., Vidal-Beaudet L., Cannavo, P., Damas, O., Schwartz, C. - Aptitude de Technosols construits avec des déchets à remplir les fonctions de filtre et d'échange, 40èmes Journées Scientifiques

du Groupe Francophone Humidimétrie et traNsferts en milieux poreux, 25-25 novembre 2015, Marne-la-Vallée, France.

Communication par affiche à des colloques, congrès, séminaires

Damas O., Guimont S., Chenon P., Séchet J., Legret M., Béchet B., Bataillard P., Colombano S., Schwartz C., Séré G., Vidal-Beaudet L., Grandmougin B., Müller F. - Procédé de construction de Sols à partir de matériaux Innovants en substitution à la TERRE végétale et aux granulats de carrière - SITERRE. *2ème Forum ResoNat / DREAM pour une gestion durable des ressources naturelles : Eaux, Sols, Forêts et Biodiversité*, 14 décembre 2010, Orléans, France.

Damas O., Abdelghafour M., Bataillard P., Béchet B., Cannavo P., Chenon P., Colombano S., Coftier A., Defrance P., Grandmougin B., Guimont S., Jean-Soro L., Legret M., Rokia S., Schwartz C., Séchet J., Séré G., Vidal-Beaudet L. – Identification of mineral and organic waste resources as alternative materials for a fertile soil construction process in landscape design. *The 6th International conference of Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and military Areas*, 3-7 October 2011, Marakkech, Morroco.

Damas, O. - Journée technique « Sols et substrats » de l'Astredhor, 18-19 janvier 2012, Orléans, France.

Rokia S., Deeb M., Schwartz C., Séré G., Cannavo P., Guimont S., Renat J.-C., Damas O., Vidal-Beaudet L. - How to recycle wastes for soil construction in urban areas? *4th International Congress Eurosoil*, 2-6 juillet 2012, Bari, Italy.

Rokia S., Vidal-Beaudet L., Séré G., Nehls T., Wessolek G., Damas O., Schwartz C. – Soil construction with technogenic materials to recycle phosphorus for plant growth in cities. *The 7th International conference of Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and military Areas*, 16-20 September 2013, Torun, Poland.

Rokia S., Séré G., Deeb M., Cannavo P., Béchet B., Legret M., Chenon P., Defrance P., Guimont S., Nehls T., Damas O., Schwartz C., Vidal-Beaudet L. – Indicators for the optimization of soil construction processes for green landscaping. *The 7th International conference of Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and military Areas*, 16-20 September 2013, Torun, Poland.

Nehls T., Paetsch L., Rokia S., Schwartz C., Wessolek G. - Phosphorus contents and availability of technogenic substrates for soil construction. *European Geosciences Union*, 27 avril – 2 mai 2014, Vienna, Austria.

Publications internationales

Rokia, S., Séré, G., Schwartz, C., Deeb, M., Fournier, F., Nehls, T., Damas, O., Vidal-Beaudet, L. (2014) - Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes. *Waste Management* 34, 2155–2162.

+ 3 articles soumis

Thèse

Rokia, S. (2014) - Contribution à la modélisation des processus d'agrégation et de transfert d'éléments nutritifs dans les Technosols construits à partir de déchets. *Thèse de doctorat*. Université de Lorraine. 319 p.

Rapports

Vidal-Beaudet, L. (2015) - Propriétés agronomiques des sols urbains construits : structuration et évolution. *Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches*. 152 p. Angers, France.

Programme Siterre (2012) - Procédé de construction de Sols à partir de matériaux Innovants en substitution à la TERRE végétale et aux granulats de carrière. *Rapport intermédiaire* (+18 mois). ADEME, 82 p. (hors annexes)

Programme Siterre (2013) - Procédé de construction de Sols à partir de matériaux Innovants en substitution à la TERRE végétale et aux granulats de carrière. *Rapport intermédiaire* (+36 mois). ADEME, 167 p. (hors annexes)

Programme Siterre (2015) - Procédé de construction de Sols à partir de matériaux Innovants en substitution à la TERRE végétale et aux granulats de carrière. *Rapport intermédiaire* (+52 mois). ADEME, 61 p. (hors annexes)

Programme Siterre (*à paraitre*). Procédé de construction de Sols à partir de matériaux Innovants en substitution à la TERRE végétale et aux granulats de carrière. *Rapport final*. ADEME.

Autres

Plante & Cité. SITERRE. Eco conception de sols urbains fertiles. *Communiqué de presse*, 14 septembre 2011. 2 p.

PROGRAMME SITERRE
-
Procédé de construction de Sols à partir de matériaux Innovants en substitution à la TERRE végétale et aux granulats de carrière

Rapport final

ANNEXES

remis le 14 décembre 2015







Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par le consortium formé pour le projet SITERRE (Plante & Cité, Valterra, Rittmo Agroenvironnement, ACTeon, Durand TP, IFSTTAR, BRGM, INPL-GISFI, Agrocampus Ouest-INHP), coordonné par Plante & Cité – Olivier DAMAS (Contrat n°0906C0063).

Coordination technique : Fabienne MULLER, Service Prévention et Gestion des Déchets, Direction Consommation Durable et Déchets ADEME (Angers).

L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, de l'énergie, du Développement durable et de la Mer et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en oeuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

www.ademe.fr

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

ANNEXES

Annexe 1 : Première liste théorique de matériaux potentiels (les 102 déchets minéraux, plastiques et inertes)....236
Annexe 2 : Première liste théorique de matériaux potentiels (les 40 déchets organiques) 243
Annexe 3 : Fiches bibliographiques détaillées pour la liste des 27 matériaux (par ordre de code déchet)....248
Annexe 4 : Les typologies de matériaux 382
Annexe 5 : Caractérisation individuelle des matériaux modèles SITERRE 386
Annexe 6 : Caractérisation individuelle des 6 mélanges modèles SITERRE 391

Annexe 1 : **Première liste théorique de matériaux potentiels (les 102 déchets minéraux, plastiques et inertes)**

Code déchet CED	Description type de déchet	Sous-catégorie de la nomenclature	Catégorie de la nomenclature
01 01 01	déchets provenant de l'extraction des minéraux métallifères	Déchets provenant de l'extraction des minéraux :	Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux :
01 01 02	déchets provenant de l'extraction des minéraux non métallifères.	Déchets provenant de l'extraction des minéraux :	Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux
01 03 06	stériles autres que ceux visés aux rubriques 01 03 04 et 01 03 05	Déchets provenant de la transformation physique et chimique des minéraux métallifères>	Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux :
01 03 08	déchets de poussières et de poudres autres que ceux visés à la rubrique 01 03 07	Déchets provenant de la transformation physique et chimique des minéraux métallifères>	Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux :
01 04 08	déchets de graviers et débris de pierres autres que ceux visés à la rubrique 01 04 07	Déchets provenant de la transformation physique et chimique des minéraux non métallifères :	Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux :
01 04 09	déchets de sable et d'argile	Déchets provenant de la transformation physique et chimique des minéraux non métallifères :	Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux :
01 04 10	déchets de poussières et de poudres autres que ceux visés à la rubrique 01 04 07	Déchets provenant de la transformation physique et chimique des minéraux non métallifères :	Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux :
01 04 11	déchets de la transformation de la potasse et des sels minéraux autres que ceux visés à la rubrique 01 04 07	Déchets provenant de la transformation physique et chimique des minéraux non métallifères :	Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux :
01 04 12	stériles et autres déchets, provenant du lavage et du nettoyage des minéraux, autres que ceux visés aux rubriques 01 04 07 et 01 04 11	Déchets provenant de la transformation physique et chimique des minéraux non métallifères :	Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux :
01 04 13	déchets provenant de la taille et du sciage des pierres autres que ceux visés à la rubrique 01 04 07	Déchets provenant de la transformation physique et chimique des minéraux non métallifères :	Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux :
01 05 04	boues et autres déchets de forage contenant de l'eau douce	Boues de forage et autres déchets de forage :	Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux :
01 05 08	boues et autres déchets de forage contenant des chlorures, autres que ceux visés aux rubriques 01 05 05 et 01 05 06	Boues de forage et autres déchets de forage :	Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux :
02 04 01	terre provenant du lavage et du nettoyage des betteraves	Déchets de la transformation du sucre	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 04 02	carbonate de calcium déclassé	Déchets de la transformation du sucre	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
03 03 09	boues carbonatées	Déchets provenant de la production et de la transformation de papier, de carton et de pâte à papier :	Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton :

05 01 16	déchets contenant du soufre provenant de la désulfuration du pétrole	Déchets provenant du raffinage du pétrole	Déchets provenant du raffinage du pétrole, de la purification du gaz naturel et du traitement pyrolytique du charbon :
05 07 02	déchets contenant du soufre	Déchets provenant de la purification et du transport du gaz naturel :	Déchets provenant du raffinage du pétrole, de la purification du gaz naturel et du traitement pyrolytique du charbon :
06 06 03	déchets contenant des sulfures autres que ceux visés à la rubrique 06 06 02	Déchets provenant de la FFDU de produits chimiques contenant du soufre, de la chimie du soufre et des procédés de désulfuration	Déchets des procédés de la chimie minérale :
06 09 02	scories phosphoriques	Déchets provenant de la FFDU des produits chimiques contenant du phosphore et de la chimie du phosphore	Déchets des procédés de la chimie minérale :
06 09 04	déchets de réactions basées sur le calcium autres que ceux visés à la rubrique 06 09 03	Déchets provenant de la FFDU des produits chimiques contenant du phosphore et de la chimie du phosphore	Déchets des procédés de la chimie minérale :
06 13 03	noir de carbone	Déchets des procédés de la chimie minérale non spécifiés ailleurs :	Déchets des procédés de la chimie minérale :
07 02 13	déchets plastiques	Déchets provenant de la FFDU de matières plastiques, caoutchouc et fibres synthétiques	Déchets des procédés de la chimie organique :
10 01 01	mâchefers, scories et cendres sous chaudière (sauf cendres sous chaudière visées à la rubrique 10 01 04)	Déchets provenant de centrales électriques et autres installations de combustion (sauf chapitre 19) :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 01 02	cendres volantes de charbon	Déchets provenant de centrales électriques et autres installations de combustion (sauf chapitre 19) :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 01 03	cendres volantes de tourbe et de bois non traité	Déchets provenant de centrales électriques et autres installations de combustion (sauf chapitre 19) :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 01 15	mâchefers, scories et cendres sous chaudière provenant de la coïncinération autres que ceux visés à la rubrique 10 01 14	Déchets provenant de centrales électriques et autres installations de combustion (sauf chapitre 19) :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 01 24	sables provenant de lits fluidisés	Déchets provenant de centrales électriques et autres installations de combustion (sauf chapitre 19) :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 01 25	déchets provenant du stockage et de la préparation des combustibles des centrales à charbon	Déchets provenant de centrales électriques et autres installations de combustion (sauf chapitre 19) :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 02 02	laitiers non traités	Déchets provenant de l'industrie du fer et de l'acier :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 02 08	déchets solides provenant de l'épuration des fumées autres que ceux visés à la rubrique 10 02 07	Déchets provenant de l'industrie du fer et de l'acier :	Déchets provenant de procédés thermiques :

10 03 02	déchets d'anodes	Déchets de la pyrométallurgie de l'aluminium	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 03 18	déchets carbonés provenant de la fabrication des anodes autres que ceux visés à la rubrique 10 03 17	Déchets de la pyrométallurgie de l'aluminium	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 08 13	déchets carbonés provenant de la fabrication des anodes autres que ceux visés à la rubrique 10 08 12	Déchets provenant de la pyrométallurgie d'autres métaux non ferreux	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 08 14	déchets d'anode	Déchets provenant de la pyrométallurgie d'autres métaux non ferreux	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 09 03	laitiers de four de fonderie	Déchets de fonderie de métaux ferreux :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 09 06	noyaux et moules de fonderie n'ayant pas subi la coulée autres que ceux visés à la rubrique 10 09 05	Déchets de fonderie de métaux ferreux :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 09 08	noyaux et moules de fonderie ayant subi la coulée autres que ceux visés à la rubrique 10 09 07	Déchets de fonderie de métaux ferreux :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 09 16	révélateur de criques usagé autre que celui visé à la rubrique 10 09 15	Déchets de fonderie de métaux ferreux :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 10 03	laitiers de four de fonderie	Déchets de fonderie de métaux non ferreux :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 10 06	noyaux et moules de fonderie n'ayant pas subi la coulée autres que ceux visés à la rubrique 10 10 05	Déchets de fonderie de métaux non ferreux :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 10 08	noyaux et moules de fonderie ayant subi la coulée autres que ceux visés à la rubrique 10 10 07	Déchets de fonderie de métaux non ferreux :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 10 14	déchets de liants autres que ceux visés à la rubrique 10 10 13	Déchets de fonderie de métaux non ferreux :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 10 16	révélateur de criques usagé autre que celui visé à la rubrique 10 10 15	Déchets de fonderie de métaux non ferreux :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 11 03	déchets de matériaux à base de fibre de verre	Déchets provenant de la fabrication du verre et des produits verriers :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 11 05	fines et poussières	Déchets provenant de la fabrication du verre et des produits verriers :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 11 10	déchets de préparation avant cuisson autres que ceux visés à la rubrique 10 11 09	Déchets provenant de la fabrication du verre et des produits verriers :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 11 12	déchets de verre autres que ceux visés à la rubrique 10 11 11	Déchets provenant de la fabrication du verre et des produits verriers :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 11 14	boues de polissage et de meulacle du verre autres que celles visées à la rubrique 10 11 13	Déchets provenant de la fabrication du verre et des produits verriers :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 11 18	boues et gâteaux de filtration provenant de l'épuration des fumées autres que ceux visés à la rubrique 10 11 17	Déchets provenant de la fabrication du verre et des produits verriers :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 12 01	déchets de préparation avant cuisson	Déchets provenant de la fabrication des produits en céramique, briques, carrelage et matériaux de construction :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 12 03	fines et poussières	Déchets provenant de la fabrication des produits en céramique, briques, carrelage et matériaux de construction :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 12 05	boues et gâteaux de filtration provenant de l'épuration des fumées	Déchets provenant de la fabrication des produits en céramique, briques, carrelage et matériaux	Déchets provenant de procédés thermiques :

		de construction :	
10 12 06	moules déclassés	Déchets provenant de la fabrication des produits en céramique, briques, carrelage et matériaux de construction :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 12 08	déchets de produits en céramique, briques, carrelage et matériaux de construction (après cuisson)	Déchets provenant de la fabrication des produits en céramique, briques, carrelage et matériaux de construction :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 12 10	déchets solides provenant de l'épuration des fumées autres que ceux visés à la rubrique 10 12 09	Déchets provenant de la fabrication des produits en céramique, briques, carrelage et matériaux de construction :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 12 12	déchets d'émaillage autres que ceux visés à la rubrique 10 12 11	Déchets provenant de la fabrication des produits en céramique, briques, carrelage et matériaux de construction :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 13 01	déchets de préparation avant cuisson	Déchets provenant de la fabrication de ciment, chaux et plâtre et d'articles et produits dérivés :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 13 04	déchets de calcination et d'hydratation de la chaux	Déchets provenant de la fabrication de ciment, chaux et plâtre et d'articles et produits dérivés :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 13 06	fines et poussières (sauf rubriques 10 13 12 et 10 13 13)	Déchets provenant de la fabrication de ciment, chaux et plâtre et d'articles et produits dérivés :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 13 07	boues et gâteaux de filtration provenant de l'épuration des fumées	Déchets provenant de la fabrication de ciment, chaux et plâtre et d'articles et produits dérivés :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 13 11	déchets provenant de la fabrication de matériaux composites à base de ciment autres que ceux visés aux rubriques 10 13 09 et 10 13 10	Déchets provenant de la fabrication de ciment, chaux et plâtre et d'articles et produits dérivés :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 13 13	déchets solides provenant de l'épuration des fumées autres que ceux visés à la rubrique 10 13 12	Déchets provenant de la fabrication de ciment, chaux et plâtre et d'articles et produits dérivés :	Déchets provenant de procédés thermiques :
10 13 14	déchets et boues de béton	Déchets provenant de la fabrication de ciment, chaux et plâtre et d'articles et produits dérivés :	Déchets provenant de procédés thermiques :
11 02 03	déchets provenant de la production d'anodes pour les procédés d'électrolyse aqueuse	Déchets provenant des procédés hydrométallurgiques des métaux non ferreux :	Déchets provenant du traitement chimique de surface et du revêtement des métaux et autres matériaux, et de l'hydrométallurgie des métaux non ferreux :
11 05 01	mattes	Déchets provenant de la galvanisation à chaud	Déchets provenant du traitement chimique de surface et du revêtement des métaux et autres matériaux, et de l'hydrométallurgie des métaux non ferreux :
15 01 07	emballages en verre	Emballages et déchets d'emballages (y compris les déchets d'emballages municipaux collectés séparément) :	Emballages et déchets d'emballages, absorbants, chiffons d'essuyage, matériaux filtrants et vêtements de protection non spécifiés ailleurs :

16 01 03	pneus hors d'usage	Véhicules hors d'usage de différents moyens de transport (y compris machines tous terrains) et déchets provenant du démontage de véhicules hors d'usage et de l'entretien de véhicules (sauf chapitres 13, 14 et sections 16 06 et 16 08)	Déchets non décrits ailleurs dans la liste :
16 01 19	matières plastiques	Véhicules hors d'usage de différents moyens de transport (y compris machines tous terrains) et déchets provenant du démontage de véhicules hors d'usage et de l'entretien de véhicules (sauf chapitres 13, 14 et sections 16 06 et 16 08)	Déchets non décrits ailleurs dans la liste :
16 01 20	verre	Véhicules hors d'usage de différents moyens de transport (y compris machines tous terrains) et déchets provenant du démontage de véhicules hors d'usage et de l'entretien de véhicules (sauf chapitres 13, 14 et sections 16 06 et 16 08)	Déchets non décrits ailleurs dans la liste :
16 11 02	revêtements de fours et réfractaires à base de carbone provenant de procédés métallurgiques autres que ceux visés à la rubrique 16 11 01	Déchets de revêtements de fours et réfractaires	Déchets non décrits ailleurs dans la liste :
16 11 04	autres revêtements de fours et réfractaires provenant de procédés, métallurgiques non visés à la rubrique 16 11 03	Déchets de revêtements de fours et réfractaires	Déchets non décrits ailleurs dans la liste :
16 11 06	revêtements de fours et réfractaires provenant de procédés non métallurgiques autres que ceux visés à la rubrique 16 11 05.	Déchets de revêtements de fours et réfractaires	Déchets non décrits ailleurs dans la liste :
17 01 01	béton	Béton, briques, tuiles et céramiques :	Déchets de construction et de démollition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
17 01 02	briques	Béton, briques, tuiles et céramiques :	Déchets de construction et de démollition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
17 01 03	tuiles et céramiques	Béton, briques, tuiles et céramiques :	Déchets de construction et de démollition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
17 01 07	mélanges de béton, briques, tuiles et céramiques autres que ceux visés à la rubrique 17 01 06.	Béton, briques, tuiles et céramiques :	Déchets de construction et de démollition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
17 02 02	verre	Bois, verre et matières plastiques	Déchets de construction et de démollition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
17 02 03	matières plastiques	Bois, verre et matières plastiques	Déchets de construction et de démollition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
17 05 04	terres et cailloux autres que ceux visés à la rubrique 17 05 03	Terres (y compris déblais provenant de sites contaminés), cailloux et boues de dragage :	Déchets de construction et de démollition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
17 05 06	boues de dragage autres que celles visées à la rubrique 17 05 05	Terres (y compris déblais provenant de sites contaminés), cailloux et boues de dragage :	Déchets de construction et de démollition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
17 05 08	ballast de voie autre que celui visé à la rubrique 17 05 07.	Terres (y compris déblais provenant de sites contaminés),	Déchets de construction et de démollition (y compris déblais provenant de sites contaminés)

		cailloux et boues de dragage :	
17 08 02	matériaux de construction à base de gypse autres que ceux visés à la rubrique 17 08 01.	Matériaux de construction à base de gypse :	Déchets de construction et de démollition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
17 09 04	déchets de construction et de démolition en mélange autres que ceux visés aux rubriques 17 09 01, 17 09 02 et 17 09 03.	Autres déchets de construction et de démolition :	Déchets de construction et de démollition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
19 01 12	mâchefers autres que ceux visés à la rubrique 19 01 11	Déchets de l'incinération ou de la pyrolyse de déchets :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 01 16	cendres sous chaudière autres que celles visées à la rubrique 19 01 15	Déchets de l'incinération ou de la pyrolyse de déchets :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 01 18	déchets de pyrolyse autres que ceux visés à la rubrique 19 01 17	Déchets de l'incinération ou de la pyrolyse de déchets :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 01 19	sables provenant de lits fluidisés	Déchets de l'incinération ou de la pyrolyse de déchets :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 02 06	boues provenant des traitements physicochimiques autres que celles visées à la rubrique 19 02 05	Déchets provenant des traitements physicochimiques des déchets (y compris déchromatation, décyanuration, neutralisation) :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 02 10	déchets combustibles autres que ceux visés aux rubriques 19 02 08 et 19 02 09	Déchets provenant des traitements physicochimiques des déchets (y compris déchromatation, décyanuration, neutralisation) :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 04 01	déchets vitrifiés	Déchets vitrifiés et déchets provenant de la fabrication :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 08 02	déchets de dessablage	Déchets provenant d'installations de traitement des eaux usées non spécifiés ailleurs	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 09 01	déchets solides de première filtration et de décrillage	Déchets provenant de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine ou d'eau à usage industriel :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 09 02	boues de clarification de l'eau	Déchets provenant de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine ou d'eau à usage industriel :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 09 03	boues de décarbonatation	Déchets provenant de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine ou d'eau à usage industriel :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 12 04	matières plastiques et caoutchouc	Déchets provenant du traitement mécanique des déchets (par	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau

		exemple : tri, broyage, compactage, granulation) non spécifiés ailleurs :	destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 12 05	verre	Déchets provenant du traitement mécanique des déchets (par exemple : tri, broyage, compactage, granulation) non spécifiés ailleurs :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 12 09	minéraux (par exemple : sable, cailloux)	Déchets provenant du traitement mécanique des déchets (par exemple : tri, broyage, compactage, granulation) non spécifiés ailleurs :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 13 02	déchets solides provenant de la décontamination des sols autres que ceux visés à la rubrique 19 13 01	Déchets provenant de la décontamination des sols et des eaux souterraines :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 13 06	boues provenant de la décontamination des eaux souterraines autres que celles visées à la rubrique 19 13 05	Déchets provenant de la décontamination des sols et des eaux souterraines :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
20 01 02	verre	Fractions collectées séparément (sauf section 15 01)	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations) y compris les fractions collectées séparément :
20 01 39	matières plastiques	Fractions collectées séparément (sauf section 15 01)	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations) y compris les fractions collectées séparément :
20 02 02	terres et pierres	Déchets de jardins et de parcs (y compris les déchets de cimetière) :	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations) y compris les fractions collectées séparément :

Annexe 2 : Première liste théorique de matériaux potentiels (les 40 déchets organiques)

Code déchet CED	Description type de déchet	Sous-catégorie de la nomenclature	Catégorie de la nomenclature
02 01 01	boues provenant du lavage et du nettoyage	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 01 02	déchets de tissus animaux	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 01 03	déchets de tissus végétaux	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 01 06	fèces, urine et fumier (y compris paille souillée), effluents, collectés séparément et traités hors site	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 01 07	déchets provenant de la sylviculture	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 02 01	boues provenant du lavage et du nettoyage	Déchets provenant de la préparation et de la transformation de la viande, des poissons et autres aliments d'origine animale :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 02 02	déchets de tissus animaux	Déchets provenant de la préparation et de la transformation de la viande, des poissons et autres aliments d'origine animale :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 02 03	matières impropres à la consommation ou à la transformation	Déchets provenant de la préparation et de la transformation de la viande, des poissons	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi

		et autres aliments d'origine animale :	que de la préparation et de la transformation des aliments
02 02 04	boues provenant du traitement in situ des effluents	Déchets provenant de la préparation et de la transformation de la viande, des poissons et autres aliments d'origine animale :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 03 01	boues provenant du lavage, du nettoyage, de l'épluchage, de la centrifugation et de la séparation	Déchets provenant de la préparation et de la transformation des fruits, des légumes, des céréales, des huiles alimentaires, du cacao, du café, du thé et du tabac, de la production de conserves, de la production de levures et d'extraits de levures, de la préparation et de la fermentation de mélasses :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 03 04	matières impropres à la consommation ou à la transformation	Déchets provenant de la préparation et de la transformation des fruits, des légumes, des céréales, des huiles alimentaires, du cacao, du café, du thé et du tabac, de la production de conserves, de la production de levures et d'extraits de levures, de la préparation et de la fermentation de mélasses :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 03 05	boues provenant du traitement in situ des effluents	Déchets provenant de la préparation et de la transformation des fruits, des légumes, des céréales, des huiles alimentaires, du cacao, du café, du thé et du tabac, de la production de conserves, de la production de levures et d'extraits de levures, de la préparation et de la fermentation de mélasses :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments

02 04 03	boues provenant du traitement in situ des effluents	Déchets de la transformation du sucre	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 05 01	matières impropres à la consommation ou à la transformation	Déchets provenant de l'industrie des produits laitiers :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 05 02	boues provenant du traitement in situ des effluents	Déchets provenant de l'industrie des produits laitiers :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 06 01	matières impropres à la consommation ou à la transformation	Déchets de boulangerie, pâtisserie, confiserie	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 06 03	boues provenant du traitement in situ des effluents	Déchets de boulangerie, pâtisserie, confiserie	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 07 01	déchets provenant du lavage, du nettoyage et de la réduction mécanique des matières premières	Déchets provenant de la production de boissons alcooliques et non alcooliques (sauf café, thé et cacao) :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 07 04	matières impropres à la consommation ou à la transformation	Déchets provenant de la production de boissons alcooliques et non alcooliques (sauf café, thé et cacao) :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
02 07 05	boues provenant du traitement in situ des effluents	Déchets provenant de la production de boissons alcooliques et non alcooliques (sauf café, thé et cacao) :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
03 01 01	déchets d'écorce et de liège	Déchets provenant de la transformation du bois et de la fabrication de panneaux et de meubles :	Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton :
03 01 05	sciure de bois, copeaux, chutes, bois, panneaux de particules et placages	Déchets provenant de la transformation du	Déchets provenant de la transformation du bois et de la

	autres que ceux visés à la rubrique 03 01 04	bois et de la fabrication de panneaux et de meubles :	production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton :
03 03 01	déchets d'écorce et de bois	Déchets provenant de la production et de la transformation de papier, de carton et de pâte à papier :	Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton :
03 03 02	boues vertes (provenant de la récupération de liqueur de cuisson)	Déchets provenant de la production et de la transformation de papier, de carton et de pâte à papier :	Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton :
03 03 05	boues de désencrage provenant du recyclage du papier	Déchets provenant de la production et de la transformation de papier, de carton et de pâte à papier :	Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton :
03 03 10	refus fibreux, boues de fibres, de charge et de couchage provenant d'une séparation mécanique	Déchets provenant de la production et de la transformation de papier, de carton et de pâte à papier :	Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton :
03 03 11	boues provenant du traitement in situ des effluents autres que celles visées à la rubrique 03 03 10	Déchets provenant de la production et de la transformation de papier, de carton et de pâte à papier :	Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton :
04 02 20	boues provenant du traitement in situ des effluents autres que celles visées à la rubrique 04 02 19	Déchets de l'industrie textile	Déchets provenant des industries du cuir, de la fourrure et du textile :
15 01 03	emballages en bois	Emballages et déchets d'emballages (y compris les déchets d'emballages municipaux collectés séparément) :	Emballages et déchets d'emballages, absorbants, chiffons d'essuyage, matériaux filtrants et vêtements de protection non spécifiés ailleurs :
17 02 01	bois	Bois, verre et matières plastiques	Déchets de construction et de démollition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
19 05 03	compost déclassé	Déchets de compostage :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 08 05	boues provenant du traitement des eaux usées urbaines	Déchets provenant d'installations de traitement des eaux usées non spécifiés ailleurs	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :

19 08 12	boues provenant du traitement biologique des eaux usées industrielles autres que celles visées à la rubrique 19 08 11	Déchets provenant d'installations de traitement des eaux usées non spécifiés ailleurs	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 12 07	bois autres que ceux visés à la rubrique 19 12 06	Déchets provenant du traitement mécanique des déchets (par exemple : tri, broyage, compactage, granulation) non spécifiés ailleurs :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
19 13 04	boues provenant de la décontamination des sols autres que celles visées à la rubrique 19 13 03	Déchets provenant de la décontamination des sols et des eaux souterraines :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :
20 01 08	déchets de cuisine et de cantine biodégradables	Fractions collectées séparément (sauf section 15 01)	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations) y compris les fractions collectées séparément :
20 01 38	bois autres que ceux visés à la rubrique 20 01 37	Fractions collectées séparément (sauf section 15 01)	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations) y compris les fractions collectées séparément :
20 02 01	déchets biodégradables	Déchets de jardins et de parcs (y compris les déchets de cimetière) :	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations) y compris les fractions collectées séparément :
20 03 03	déchets de nettoyage des rues	Autres déchets municipaux :	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations) y compris les fractions collectées séparément :
20 03 06	déchets provenant du nettoyage des égouts	Autres déchets municipaux :	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations) y compris les fractions collectées séparément :

Annexe 3 : Fiches bibliographiques détaillées pour la liste des 27 matériaux (par ordre de code déchet)

Bois issu des déchets de construction : 17-02-01

Déchets provenant de la sylviculture : 02-01-07

Sciure de bois, copeaux, chutes, bois, panneaux de particules et placages autres que ceux visés à la rubrique 03-01-04: 03-01-05

17 02 01	Bois issu des déchets de construction	Bois	Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
02 01 07	Déchets provenant de la sylviculture	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
03 01 05	Sciure de bois, copeaux, chutes, bois, panneaux de particules et placages autres que ceux visés à la rubrique 03 01 04	Déchets provenant de la transformation du bois et de la fabrication de panneaux et de meubles	Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton

Cette fiche est susceptible d'inclure :

- Les déchets de bois de chantier : échafaudages, étaiements, coffrage, déchets de panneaux à base de bois, déchets d'emballage lourd et léger, bois de déconstruction (charpente, menuiseries, parquets...) ;
- Les chutes et déchets de bois issus de l'activité sylvicole : houppiers, branchage, souches écorces, dosses, délignures, sciures, chutes de tronçonnages, noyaux de déroulage, etc. ;
- La sciure de bois, les copeaux, les chutes de bois, les panneaux de particules et placages issus des industries de transformation et de fabrication du bois et sans substances dangereuses.

[Source : ADEME : fiche « Déchets de bois »]

Ces quatre catégories sont regroupées car elles traitent de matériaux semblables. On réalisera l'approximation que la composition du bois est sensiblement la même d'une catégorie à l'autre.

Il existe plusieurs sources d'hétérogénéité pour ces matériaux telles que l'essence de l'arbre abattu, ou encore le tissu végétal dont ils sont issus (différences de composition entre bois d'aubier et duramen par exemple). Par souci de simplicité, on considérera ici que les tissus végétaux ligneux sont relativement semblables et présentent des caractéristiques similaires.

Le bois possède un rapport de la matière sèche sur la matière brute d'environ 69% (valeur calculée par moyenne sur des granulats et copeaux commercialisés pour la création d'espace verts). Cette valeur présente une forte variabilité car elle dépend notamment de l'essence considérée.

[Source : Agresta]

Remarque : On notera que la plupart des informations obtenues concernant la sciure et les copeaux de bois sont issues d'une même source : Agresta (professionnel du paillage d'espaces verts). Dans le cas idéal, les données seraient issues de plusieurs sources différentes, mais le manque de caractérisation scientifique sur ces matériaux ne permet pas une telle rigueur.

Remarque sur le gisement du déchet « bois » :
Selon une étude CTBA (Centre Technique du Bois et de l'Ameublement), le gisement de déchets bois produits au sein des entreprises de 1ère et seconde transformation (au total, activité de sciage, emballage, construction et ameublement) est estimé à environ **12 millions de tonnes**. A cela s'ajoute un volume de **4 millions de tonnes de déchets bois** issus des chantiers du bâtiment, **90% du gisement** de déchets bois produits au sein des entreprises de 1ère et seconde transformation **est déjà valorisé**.
[Source : ADEME : fiche « Déchets de bois »]

Caractéristiques physiques des matériaux

Portance

A priori, il existe peu d'informations bibliographiques concernant la portance du bois, ou de tout autre de ses dérivés. Néanmoins, il est possible d'en donner une estimation :

- Branches, poutres et morceaux de bois de grande taille : **portance moyenne (2)**
- Brindille, et bois débité en copeaux ou en sciure : **portance faible (1)**

Portance	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Forte

Conductivité des lixiviats

Aucune donnée n'a été trouvée quant à la conductivité des lixiviats sur bois.

Une approximation a pu être obtenue à partir de valeurs calculées sur des copeaux et « granulats » vendus par le professionnel Agresta. **On trouve en moyenne une conductivité de 0,11 mS/cm**, valeur qui semble plausible. Cette moyenne reste cependant entourée d'incertitudes :

- Tous les éventuels traitements du bois (notamment thermiques, qui affectent alors directement les molécules composantes du matériau) composant ces produits ne sont pas nécessairement détaillés dans les fiches descriptives consultables sur le site. Un traitement de minéralisation semble être appliqué.
- La méthode d'obtention de la mesure ne relève pas exactement de la lixiviation : elle s'inspire de la norme NF EN 12176 permettant d'estimer le pH de boues.

[Source : Agresta. Méthode : moyenne simple sur trois valeurs disponibles]

Densité apparente

La densité apparente du bois brut est variable selon l'humidité et l'essence considérée.

- Dans une atmosphère à 15% d'humidité, on peut considérer que le **bois brut** présente en moyenne une **densité apparente de 0,4 à 1,0**. Cette valeur est donc valable pour :
  - Les déchets de la sylviculture ;
  - Les déchets du bois de construction.

  [Source : http://passion.bois.free.fr/ Méthode : gamme de valeurs reprise directement]
- **Les sciures et copeaux de bois** étant débités en unités bien plus petites, leur densité apparente est nécessairement inférieure à celle du bois brut.

Une moyenne simple pour la masse volumique apparente a pu être calculée sur 5 produits de paillage de la société Agresta. On obtient une valeur de 230 kg/m^3.
La densité est égale à la masse volumique du matériau considéré divisée par la masse volumique de l'eau (1000 kg/m^3). La valeur trouvée correspond donc à une **densité apparente de 0,23**.

[Source : Agresta. Méthode : moyenne simple sur 5 valeurs disponibles]

Perméabilité à l'eau

Aucune donnée n'a été trouvée concernant la perméabilité du bois brut à l'eau.

Néanmoins, une donnée voisine permet de donner une idée de ce paramètre: la capacité de rétention de l'eau du matériau :

Pour les **copeaux et sciures**, la capacité de rétention, estimée par moyenne sur produits Agresta **secs**, est de **253 mL/L.** Ainsi, en proportion, 75% de l'eau infiltrée semble pouvoir continuer son infiltration après avoir traversé le matériau.

Perméabilité à l'eau		
Gamme	**Appréciation quantitative Ks (m/s)**	**Appréciation qualitative**
0	$10^{-2} \leq Ks < 10^{-4}$	Perméable
1	$10^{-4} \leq Ks < 10^{-7}$	Semi perméable
2	$10^{-7} \leq Ks < 10^{-10}$	Imperméable
3	$Ks \geq 10^{-10}$	Très imperméable

[Source : Agresta. Méthode : moyenne simple sur 3 valeurs disponibles]

Structure (agrégation)

Il n'existe **pas de structure** ou de phénomène d'agrégation pour le bois et ses dérivés.

Structure	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Bonne

Granulométrie

- La granulométrie n'est pas un paramètre pertinent pour le **bois brut** et ses dérivés les plus directs. On retiendra, au vu de la taille de tels matériaux, la valeur maximale possible.

Granulométrie du bois brut		
Gamme	**Appréciation quantitative Taille de particules**	**Appréciation qualitative**
0	T < 2 µm	Argileux
1	2 ≤ T < 50 µm	Limoneux
2	50 ≤ T < 2 mm	Sableux
3	T ≥ 2 mm	Grossier

- La granulométrie des **sciures et copeaux de bois** risque, de par sa définition, d'être assez variable. En effet, tout dépend du calibrage appliqué aux procédés dont les sciures (ou autres composants entrant dans la catégorie définie précédemment) sont issues.
  Néanmoins, un ordre de grandeur peut être fourni par une moyenne sur des copeaux utilisés en aménagement d'espaces verts. Ainsi, une moyenne calculée sur 5 produits de la société Agresta donne une granulométrie de **7/26 mm.** Si ce chiffre précis correspond à une moyenne sur des calibrages précis déterminés par l'entreprise, et donc ne reflète pas avec précision ce qu'on peut attendre dans le cadre du projet, on peut estimer que l'ordre de grandeur est équivalent. (Granulométrie de l'ordre du millimètre).

Granulométrie des sciures et copeaux de bois		
Gamme	**Appréciation quantitative Taille de particules**	**Appréciation qualitative**
0	T < 2 µm	Argileux
1	2 ≤ T < 50 µm	Limoneux
2	50 ≤ T < 2 mm	Sableux
3	T ≥ 2 mm	Grossier

[Source : Agresta. Méthode : moyenne simple sur 5 valeurs disponibles]

Caractéristiques agronomiques des matériaux

pH

Aucune mesure ne semble disponible pour ce paramètre.

$CaCO_3$ total

A titre informatif, la composition du bois est la suivante (exemple du hêtre, mais composition relativement représentative du bois brut de façon générale) :

- 40% d'eau ;
- 0,65% de cendres ;
- 59,35% d'éléments combustibles.

[Source : http://www.econologie.com/]

A priori, **aucune essence concernée ne contient ou n'accumule de $CaCO^3$**.

Carbonatation		
Gamme	**Appréciation quantitative Pourcentage de $CaCO_3$**	**Appréciation qualitative**
0	0%	Absente
1	0≤ $CaCO_3$ < 1 %	Faible
2	1 ≤ $CaCO_3$< 10 %	Moyenne
3	$CaCO_3$ ≥ 10 %	Importante

N total

Aucune donnée bibliographique n'a été retrouvée.

Carbone organique

Le carbone organique est relié au taux de matière organique.

Une moyenne calculée sur les produits Agresta donne un pourcentage de la matière organique sur la matière sèche d'environ **98%.**

[Source : Agresta. Méthode : moyenne sur 6 valeurs disponibles]

Cette donnée est confirmée par un site spécialisé, qui chiffre 98,5 à 99% de matière organique sur la matière sèche.

[Source : http://inforets.free.fr/article.php3?id_article=208]

Considérant un ratio théorique de la teneur en MO sur la teneur en carbone organique de 2, **la teneur en carbone organique est estimée de l'ordre de 50 %.**

CEC

Il ne semble pas exister de données concernant ce paramètre pour le bois brut ou ses dérivés.
La conductivité sur lixiviats étant faible (voir paragraphe ci-avant), et compte tenu des connaissances scientifiques sur le bois, on peut malgré tout affirmer que la **CEC sera faible**.

P assimilable

D'un point de vue atomique, le bois, et donc les copeaux, sciures et divers matériaux qui sont issus de sa transformation physique, est composé d'environ :

- 50% de Carbone ;
- 43% d'Oxygène ;
- 6% d'Hydrogène ;
- 1% d'Azote.

[Source : Le Guide du bois et ses dérivés ; D. Bolmont et M. Fouchard ; éditions AFNOR]

Le **Phosphore n'est donc pas un élément majoritaire dans la composition du bois.**

Aucune donnée n'a été obtenue quant à son extraction et son potentiel à être assimilé, mais on peut estimer que le potentiel de fertilisation phosphatée de ces matériaux est faible. (Le peu de phosphore en présence sera vraisemblablement intégré dans des formes ioniques ou complexées, ainsi il est peu probable qu'il soit assimilable).

P assimilable		
Gamme	**Appréciation quantitative** **P assimilable (g/kg) préciser méthode d'extraction**	**Appréciation qualitative de la fertilité phosphatée**
0	P < 0,04	Très faible
1	0,04 ≤ P < 0,08	Médiocre
2	0,08 ≤ P < 0,12	Normale/correcte
3	P ≥ 0,12	Elevée

Caractéristiques de dangerosité des matériaux

pH sur éluat

Les données physico-chimiques fournies par le professionnel Agresta donnent un **pH moyen de 6**.

Notons cependant que les traitements appliqués au bois de ce professionnel (notamment un traitement thermique et de minéralisation) peuvent avoir affecté le pH sur éluat.

[Source : Agresta. Méthode : moyenne sur 5 valeurs disponibles]

Un autre professionnel fait état d'un **pH de 5,5**. Il ne précise cependant pas la méthode d'obtention de cette valeur. La valeur qu'il fournit reste proche de celle énoncée précédemment.

[Source : Marc Miquel, Ecolabel pour une gamme de supports de culture en cultures semencières, maraîchères et florales]

Teneur ou concentration totale en polluants

Le bois déchet peut être brut, c'est-à-dire sans aucun ajout d'adjuvant (exemples : chutes de scierie, écorces, copeau d'usinage) mais également non brut, c'est-à-dire qu'il a reçu l'ajout d'un adjuvant :

- de la colle (exemple : les panneaux à base de bois) ;
- un produit de préservation (exemple : revêtements extérieurs d'un bâtiment avec des lames de bois) ;
- un produit de finition (exemple : un meuble).

Le déchet de bois brut qui n'a reçu aucun adjuvant (chutes d'élagage, chutes de scieries, copeaux d'usinage, chutes d'emballage) ne génère pas de pollution spécifique.

Le déchet d'emballage est souvent traité et associé à des éléments métalliques (clous, charnières…), il représente donc un impact à plus long terme sur l'environnement.

Les déchets de bois souillés peuvent contaminer le milieu naturel, les produits dangereux qu'ils contiennent peuvent s'infiltrer dans les sols, contaminer les nappes phréatiques ou perturber le fonctionnement normal des usines de dépollution des eaux usées.

Compte tenu de la variabilité des sources des matériaux utilisés, il est difficile de donner une quantification précise de ces éventuels polluants. **On considérera donc la contamination comme possible.**

[Source : ADEME : fiche « Déchets de bois »]

Teneur/Concentration totale des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	En trace
2	Contamination possible
3	Contamination fréquente

Disponibilité des polluants

Ainsi que vu précédemment, les matériaux étudiés peuvent contenir des polluants susceptibles de contaminer le milieu naturel, de s'infiltrer dans les sols et de contaminer les nappes phréatiques.

La typologie de ces polluants est trop variée pour pouvoir donner une caractérisation générale de leur disponibilité. Néanmoins, **tout polluant qui serait dans la phase liquide du sol est potentiellement disponible**, pour peu qu'il ne s'**adsorbe** pas immédiatement à des complexes argilo-humiques ou à des groupements bactériens.

Disponibilité des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	Très faible/négligeable
2	Possible en différé
3	Possible en immédiat

Bibliographie

Ouvrages et documents publiés

- D. Bolmont et M. Fouchard , Le Guide du bois et ses dérivés ; éditions AFNOR
- M. Miquel, Ecolabel pour une gamme de supports de culture en cultures semencières, maraîchères et florales

Liens internet:

- ADEME : fiche « Déchets de bois » : http://www2.ademe.fr/servlet/list?catid=14651
- Agresta, site professionnel : http://www.agresta.fr/
- Econologie.com : http://www.econologie.com/proprietes-des-pellets-de-bois-articles-3623.html
- Inforets , site traitant de la sylviculture: http://inforets.free.fr/article.php3?id_article=208
- Passion bois, site traitant du bois d'ameublement : http://passion.bois.free.fr/

Boues provenant du traitement in situ *des effluents de l'industrie laitière: 02-05-02*

02-05-02	boues provenant du traitement *in situ* des effluents	Déchets provenant de l'industrie des produits laitiers :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments

Lactosérum, eau de lavage= eau blanche, boues

La composition des eaux résiduaires produites par des usines de l'industrie laitière française varie d'un site à l'autre et selon le type de produit fabriqué. Cependant, de façon globale, bien que les caractéristiques de ces rejets sont souvent variables dans le temps (Castillo de Campins, 2005), la composition moyenne s'apparente à celle du lait, plus ou moins dilué (0,5-4 % du lait reçu rejoint les eaux d'égouts ; Räsäsen *et al.*, 2002).

Caractéristiques physiques des matériaux

Portance

La siccité des boues biologiques est de 4,6 % et celle des boues physico-chimiques est de 7,3 % (Epstein, 2010).

Le pourcentage de matières sèches des boues issues du traitement des effluents laitiers est de 4,8 % (Chambre de Haute-Loire, 2012).

Conclusion :

Les boues semblent avoir une siccité très faible : on peut penser qu'elles sont donc très liquides, ce qui conduit à une portance quasi-nulle.

Portance	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Forte

Conductivité des lixiviats

La conductivité des effluents issus du procédé de lavage de la ligne de production de l'industrie laitière est évaluée à 4,82 mS/cm (Cercado Quezada, 2009).

Conclusion :

La conductivité des effluents laitiers a été estimée à 4,82 mS/cm.

Densité apparente

Aucune valeur n'a pu être obtenue concernant la densité apparente. Cependant, on peut supposer que dans le cas des eaux blanches, composées essentiellement d'eau, cette densité soit proche de 1.

Perméabilité à l'eau

Pas de données obtenues concernant la perméabilité à l'eau.

Structure (agrégation)

Pas de données obtenues concernant la structure.

Granulométrie

Pas de données obtenues concernant la granulométrie.

Caractéristiques agronomiques des matériaux

pH

Le pH des boues issues du traitement des effluents ont un pH de 9,1 (Chambre de Haute-Loire, 2012).

Exemples de la composition moyenne d'effluents modèles préparés au laboratoire à partir de laits écrémés et entiers dilués (Castillo de Campins, 2005) :

Type d'effluent	pH
Ecrémé	7,59
Ecrémé + acide	2,75
Ecrémé + base	11,25
Entier	7,49
Entier + acide	2,68
Entier + base	11,7

Les effluents modèles utilisés dans cette étude ont été élaborés à partir de laits écrémés ou entiers dilués 10 à 50 fois avec de l'eau du réseau […]. Afin de simuler des cycles de lavage, le milieu est additionné de composés acides ou basiques purs en solution ou sous forme de lessive commerciale selon un protocole de lavage habituellement suivi dans une industrie de production laitière (Castillo de Campins, 2005).

Le dernier milieu testé comme combustible est composé des rejets de la ligne de lavage de l'industrie laitière, possédaient un pH alcalin (pH 12.9) (Cercado Quezada, 2009).

Conclusion :

Selon les ajouts (liquides de nettoyage, autres produits), le pH varie très fortement. Cependant, on peut noter que le lait a une composition plutôt neutre.

pH		
Gamme	**Appréciation quantitative Valeurs de pH**	**Appréciation qualitative**
0	pH < 5	Acide
1	5 ≤ pH < 6,5	Acide/neutre
2	6,5 ≤ pH < 7,5	Neutre
3	pH ≥ 7,5	Basique

$CaCO_3$ total

Les boues contiennent 17 kg de CaO par tonne de MS (Chambre de Haute-Loire, 2012).

Conclusion :

Le $CaCO_3$ n'est pas cité dans la composition des effluents de laiterie. Seule la valeur de 17 kg de CaO par tonne de MS a été trouvée.

Carbonatation		
Gamme	**Appréciation quantitative Pourcentage de $CaCO_3$**	**Appréciation qualitative**
0	0%	Absente
1	0≤ $CaCO_3$ < 1 %	Faible
2	1 ≤ $CaCO_3$< 10 %	Moyenne
3	$CaCO_3$ ≥ 10 %	Importante

N total

Les boues contiennent **5,9 kg d'azote total par tonne de MS** (Chambre de Haute-Loire, 2012), soit 0,59 %.

Carbone organique

Les boues ont un rapport C/N (carbone organique/ azote total) de 3,1 et contiennent 5,9 kg d'azote total par tonne de MS (Chambre de Haute-Loire, 2012). On peut donc déduire une teneur en carbone organique de 18,3 kg par tonne de MS.

Conclusion :

On retient donc la valeur de 18,3 kg de carbone organique par tonne de MS, soit 1,83 %. Cette valeur semble possible au vu de la faible siccité des boues, mais elle devrait être confirmée par des sources complémentaires.

CEC

Pas de données obtenues concernant la CEC.

P assimilable

Les boues contiennent 6,7 % de phosphore (Chambre de Haute-Loire, 2012).

Le phosphore est un élément prédominant dans les boues de laiterie-fromagerie-agroalimentaire lié à la composition du lait et aux lessives utilisées. On considère qu'il y a au minimum 70 % du phosphore total qui est disponible pour les cultures (Chambre d'agriculture de la Meuse).

Conclusion :

La teneur en phosphore disponible semble importante dans ces effluents.

P assimilable		
Gamme	**Appréciation quantitative P assimilable (g/kg) préciser méthode d'extraction**	**Appréciation qualitative de la fertilité phosphatée**
0	P < 0,04	Très faible
1	0,04 ≤ P < 0,08	Médiocre
2	0,08 ≤ P < 0,12	Normale/correcte
3	P ≥ 0,12	Elevée

Caractéristiques de dangerosité des matériaux

pH sur éluat

Aucune valeur n'a été trouvée concernant le pH sur éluat.

Teneur ou concentration totale en polluants

Les effluents de laiterie (eaux blanches) proviennent du lavage des locaux et sont plus chargées en matières organiques que des eaux usées organiques. Certains produits de nettoyages sont ajoutés mais aucune donnée d'analyse n'a pu être trouvée.

Teneur en métaux lourds des boues d'industrie laitière (Conde Suárez *et al.*, 2004) :

Métal	**Teneur (mg/g)**
Cd	0,2
Cr	17,3
Cu	47,8
Hg	0,3
Ni	8,9
Pb	13,7
Zn	427,2

Ces valeurs en métaux lourds sont plutôt inférieures à celles obtenues pour les boues de station d'épuration, sauf dans le cas du Zinc.

Conclusion :

Teneur/Concentration totale des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	En trace
2	Contamination possible
3	Contamination fréquente

Disponibilité des polluants

Aucune donnée bibliographique relative à la disponibilité des polluants n'a été retrouvée

Bibliographie

Castillo de Campins Soraya (2005) Etude d'un procédé compact de traitement biologique aérobie d'effluents laitiers, thèse présentée à l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, http://eprint.insa-toulouse.fr/archive/00000074/01/Castillo.pdf

CERCADO QUEZADA B. (2009) Traitement de déchets issus de l'industrie agro-alimentaire par pile a combustible microbienne, thèse de l'institut national polytechnique de Toulouse.
Chambre d'agriculture de Haute-Loire (non daté) Epandage des boues urbaines/agro-industrielles en agriculture, http://www.haute-loire.chambagri.fr/Epandage-des-boues-urbaines-agro.html, site internet consulté le 16/02/2012.

Epstien A. (2010) Filières de traitement des effluents de laiterie: cas pratique, mars 2010, journée technique du 5 mars 2010 ODIPURE, http://www.publications-environnement.fr/public/Aurelien_EPSTEIN.pdf

Pointurier H. (2003) La gestion matière dans l'industrie laitière, Ed. Tec&Doc.

Conde Suárez L.P., Seoane S., López Mosquera E., Solla-Gullón F. et Merin A. (2004) Dairy industry sewage sludge as a fertilizer for an acid soil: a laboratory experiment with Lolium multiflorum, Spanish Journal of Agricultural Research, pp.419-427.

Les boues de laiterie-fromagerie-agroalimentaire, Chambre d'agriculture de la Meuse,
http://www.meuse.chambagri.fr/fileadmin/documents/site_1/internet/environnement/MRAD/NoteBoueslaiterie.pdf

Remarque :
Le livre suivant pourrait contenir des informations complémentaires mais n'a pu être trouvé dans les temps.

Merillot J.-M. et de Lauzanne R. (1986) La Valorisation agricole des boues de laiterie, Agence nationale pour la récupération et l'élimination des déchets, Ed. ANRED.

Déchets de boulangerie - pâtisserie: matières impropres à la consommation ou à la transformation: 02-06-01

02-06-01	matières impropres à la consommation ou à la transformation	Déchets de boulangerie, pâtisserie, confiserie	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments

Les matériaux inclus dans cette rubrique sont notamment les suivants : invendus, huile de friture, déchets de pâtes, coquilles d'œufs, farine. Devant la disparité des produits proposés, chaque produit est traité séparément car aucune donnée générale sur les déchets de boulangerie n'a été trouvée.

Composition indicative de quelques déchets de pain et de boulangerie-pâtisserie (Moletta & al., 2009) :

Composition moyenne ($g.kg^{-1}$ de MS)	Pain rassis	Déchets de boulangerie
Matière sèche $g.kg^{-1}$ frais	676	893-920
Protéines brutes	160	54-158
Matières grasses brutes	33	12-120
Cendres	29	18-50
Amidon	525	662-685
NDF	30	119-256
ADF	19	5-10
Ca	10	2-3
P	20	2-5

Composition de la farine (type 55) (Boulangerie.net, 2012) :

- eau 0,5 à 15,5 %
- amidon 60,0 à 72,0 %
- sucres 1,0 à 2,0 %
- protéines (gluten) 8,0 à 12,0 %
- lipides 1,2 à 1,4 %
- matières minérales 0,5 à 0,6 %
- cellulose quelques traces

Composition d'une coquille d'œuf (Arnould, 2012) :

- carbonate de calcium 94 %
- carbonate de magnésium 1 %
- phosphate de potassium 1 %
- matières organiques 4 %

Caractéristiques physiques des matériaux

Portance

Pas de données obtenues concernant la portance. Cependant, au regard de leur composition (organique), la portance de ces déchets est considérée comme nulle.

Portance	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne

3	Forte

Conductivité des lixiviats

Pas de données obtenues concernant la conductivité des lixiviats.

Densité apparente

L'huile de palme a une densité apparente de 0.889-0.895 à 50ºC (commission du codex alimentarus, 1999).
L'huile de palme a une densité apparente de 0,92 (FAO, 1992)
La densité apparente de la farine est de 1,03 (BRGM, 2012).
Conclusion :
La densité apparente de l'huile est comprise entre 0,889 et 0,92. La densité de la farine est de 1,03.

Perméabilité à l'eau

L'huile de friture n'est pas perméable à l'eau.

Pas de données obtenues concernant la perméabilité.

Structure (agrégation)

Pas de données obtenues concernant la structure.

Granulométrie

Coquilles d'œufs : les coquilles sont généralement centrifugées en sortie d'usine. Cette étape permet un premier broyage, qui sera complété au cours des manutentions du produit. Au moment de l'épandage, la granulométrie est inférieure à 4 millimètres (Omnes, 2003).

Farine : la granulométrie de la farine [à pâtisserie] doit rester homogène (40 micromètres plus ou moins 0,5) (Boudreau, Ménard, 1992).

Conclusion :

Lorsque les coquilles sont broyées, la granulométrie reste supérieure à 2 mm. La farine à pâtisserie a une granulométrie limoneuse. Pas de donnée obtenue concernant la granulométrie des autres déchets.

Granulométrie		
Gamme	**Appréciation quantitative Taille de particules**	**Appréciation qualitative**
0	T < 2 µm	Argileux
1	2 ≤ T < 50 µm	Limoneux
2	50 ≤ T < 2 mm	Sableux
3	T ≥ 2 mm	Grossier

Caractéristiques agronomiques des matériaux

pH

Coquille d'œuf : composé à 45 % de CaO (le composant de la chaux), ce sous-produit de l'activité des casseries séduit un nombre croissant d'agriculteurs à la recherche **d'amendement basique** (Omnes, 2003).

Farine : le pH de la farine chlorée se situe entre 4,5 et 4,9 (Boudreau, Ménard, 1992).

Conclusion :

L'huile n'a pas de pH (utilisé dans les solutions aqueuses). Les coquilles d'œufs sont basiques (pas de donnée numérique obtenue).

pH		
Gamme	**Appréciation quantitative Valeurs de pH**	**Appréciation qualitative**
0	pH < 5	Acide
1	5 ≤ pH < 6,5	Acide/neutre
2	6,5 ≤ pH < 7,5	Neutre
3	pH ≥ 7,5	Basique

$CaCO_3$ total

Coquille d'œuf : **composé à 45 % de CaO** (le composant de la chaux), ce sous-produit de l'activité des casseries séduit un nombre croissant d'agriculteurs à la recherche **d'amendement basique** (Omnes, 2003).

D'après la composition de la farine présentée au début de cette fiche, celle-ci ne contient pas de CACO3.

Conclusion :

L'huile et la farine ne contiennent pas de $CaC0_3$.
Les coquilles d'œufs sont riches en $CaCO_3$.

N total

Aucune valeur n'a été obtenue pour l'azote total.

Carbone organique

L'huile ne contient pas de carbone organique. Pour les autres types de déchets, aucune donnée concernant la teneur en carbone organique n'a été obtenue.

CEC

Aucune valeur n'a été obtenue pour la CEC.

P assimilable

La farine contient 107 mg/g de phosphore (Souci, Fachmann, Kraut, 2008).
L'huile ne contient pas de phosphore (Souci, Fachmann, Kraut, 2008).

Conclusion :

L'huile ne contient pas de P assimilable.
La farine est très riche en phosphore, mais la teneur en phosphore assimilable n'est pas connue.

Caractéristiques de dangerosité des matériaux

pH sur éluat

Le pH sur éluat n'est pas pertinent dans le cas de l'huile de friture. Ce paramètre n'a pas été trouvé pour les autres déchets.

Teneur ou concentration totale en polluants

D'après la composition de la **farine** présentée au début de cette fiche, celle-ci ne contient pas de polluants.
De même, d'après la composition d'une **coquille d'oeuf** présentée au début de cette fiche, celle-ci ne devrait pas contenir de polluants.
En 2002, le Service de protection de la consommation à Genève a prélevé 32 échantillons **d'huiles de friture** qui semblaient être sur-utilisées, sur la base d'une appréciation visuelle et olfactive. Sur les 32 échantillons ciblés selon cette appréciation : 40,6 % des échantillons se sont avérés non-conformes (Service de protection de la consommation à Genève, 2002).

Seule l'huile de friture usagée est susceptible de contenir des traces de polluants.

Teneur/Concentration totale des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	En trace
2	Contamination possible
3	Contamination fréquente

Disponibilité des polluants

Aucune donnée concernant la disponibilité des polluants n'a été obtenue.

Bibliographie

Général :
Moletta R. et al. (2009) Le traitement des déchets, Ed. Tec&Doc.

Coquille d'œuf :

Omnès G. (2003) L'amendement calcique sort de sa coquille, La France Agricole, vol. 2968.
Arnould F. (non daté) TP n°6 : détermination du pourcentage de carbonate de calcium dans une coquille d'œuf, physiquark.free.fr, site internet consulté le 25/02/2012, http://physiquark.free.fr/IMG/pdf/TP06_DosageCarbonateCoquilleOeuf_V2.pdf

Farine :

Boudreau A. et Ménard G. (1992) Le Blé: éléments fondamentaux et transformation, Presse Université Laval.
boulangerie.net (non daté) Dossier matières premières blé/farine, site internet consulté le 25/02/2012, http://www.boulangerie.net/MP/InfoBlefar.html#farine
Souci S.W., Fachmann W. et Kraut H. (2008) La composition des aliments, tableaux des valeurs nutritives, 7ème édition revue et corrigée, MedPharm.
BRGM (non daté) Les matières premières minérales, site internet consulté le 27/02/2012, http://www.mineralinfo.org/Densite/Divers.htm

Huile de friture :

Commission du Codex Alimentarus OMS/FAO (1999) Rapport de la seizième session du comité du codex sur les graisses et les huiles, http://www.fao.org/docrep/meeting/005/x1736f/x1736f00.htm#Contents

Service de protection de la consommation à Genève (2002) Les huiles de friture.
FAO (1992) L'après-récolte des grains - organisation et techniques, http://www.fao.org/docrep/T0522F/T0522F08.htm

Boues de désencrage provenant du recyclage du papier: 03-03-05

Boues provenant du traitement in situ des effluents autres que celles visées à la rubrique 03 03 10: 03-03-11

03 03 05	Boues de désencrage provenant du recyclage du papier	Déchets provenant de la production et de la transformation de papier, de carton et de pâte à papier :	Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton :
03 03 11	Boues provenant du traitement in situ des effluents autres que celles visées à la rubrique 03 03 10	Déchets provenant de la production et de la transformation de papier, de carton et de pâte à papier :	Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton :

Les **boues de désencrage provenant du recyclage du papier (03 03 05)** sont issues du processus de séparation de l'encre des fibres de PPCR (Produits à base de papiers-cartons récupérés) par flottation. Le traitement des mousses récupérées en surface des cellules de flottation aboutit à la production de boues de désencrage. Celles-ci contiennent des encres, du savon, des charges minérales issues des PPCR et des résidus de fibres cellulosiques entraînés lors du désencrage.

Les usines générant ces boues de désencrage utilisent des papiers récupérés, et sont équipées d'unités de désencrage. Il s'agit le plus souvent d'usines produisant du papier journal, du papier à impression écriture et du papier sanitaire à base de papiers récupérés.

[Source : fiche identité déchets : boues papeterie ADEME, 2001]

[Source : site de l'ADEME : http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?catid=14624]

La **catégorie 03 03 11 : « Boues provenant du traitement in situ des effluents autres que celles visées à la rubrique 03 03 10 »**, constitue une catégorie « par défaut », regroupant a priori les boues primaires et les boues biologiques de papeterie. La distinction entre ces deux types de boues est cruciale, car elle conditionne de nombreux paramètres, dont la teneur en matières organiques. Ainsi, il conviendra de toujours établir une distinction (lorsque les données le permettent) entre ces deux types de boues.

Pour rappel :

- Les **boues primaires** sont les dépôts récupérés par une simple décantation des eaux usées (dans les décanteurs-digesteurs par exemple). Elles présentent des concentrations élevées en matières minérales (sables, terre…) mais aussi en matière organique pouvant évoluer.
- Les **boues biologiques** sont aussi appelées boues secondaires, et proviennent d'une épuration biologique des eaux (boues activées, disques biologiques, lits bactériens…). Ces boues, de concentrations médiocres (10 g/l), sont très organiques car elles sont principalement constituées de corps bactériens et de leurs sécrétions.
- Les **boues mixtes** sont quant à elles constituées d'un mélange de boues primaires et biologiques.

[Source : http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3436]

On peut ici faire l'hypothèse que les boues de désencrage issues du recyclage du papier présentent (à l'encre et aux solvants près) une **composition assez similaire à celle des boues de papeterie de façon générique**. En

effet, ces boues contiennent dans les deux cas une quantité non négligeable de fibres, dont la taille sera certes plus réduite dans le cas des boues issues de recyclage, mais dont la nature et l'origine restent les mêmes.

Cette fiche se basera donc sur la caractérisation des boues de papeterie en général, avec des précisions sur les boues de désencrage dès lors que des données spécifiques sont disponibles.

De nombreuses données chiffrées de cette fiche sont extraites d'analyses de boues qui avaient été mises à la disposition des acteurs du projet Siterre. Il semblerait néanmoins utile et pertinent d'en **obtenir d'autres**, afin que les **moyennes chiffrées** reflètent une plus grande variété.

Caractéristiques physiques des matériaux

Portance

Aucune valeur n'a pu être obtenue pour ce paramètre.

Cependant, les boues papeterie présentent un taux de matière sèche d'environ 50%, et sont qualifiées de « produit pâteux ».

[Source : fiche identité déchets : boues papeterie ADEME, 2001]

On peut donc estimer, à la lumière de cette information, que la portance sera faible.

Portance	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Forte

Conductivité des lixiviats

Aucune donnée n'a pu être trouvée pour ce paramètre.

Densité apparente

La masse spécifique de boues de papeteries caractérisées dans le cadre d'un travail de recherche est de l'ordre de **2.36 g/cm^3**.

Pour information, la masse volumique absolue de ce produit est de 2,56 g/L.

[Source : Récupération et valorisation de la boue de papeterie comme ajout dans les mortiers, B. Rabehi, Y. Ghernouti, *1st International Conference on Sustainable Built Environement Infrastructures in Developing Countries*, ENSET Oran (Algérie), 2009]

Perméabilité à l'eau

Aucune donnée ne semble disponible pour ce paramètre.

Notons que l'éventuelle déshydratation des boues conditionnera largement la valeur de celui-ci.

Structure (agrégation)

Aucune donnée traitant spécifiquement de ce paramètre n'a pu être trouvée.

Notons que selon le type de boues considérées, des matières organiques et des bactéries peuvent potentiellement créer de type colloïdes.

Encore une fois, le facteur « hydratation des boues » est également prépondérant : plus elles seront déshydratées, plus la matière en suspension sera cohésive, et agrégée.

Structure	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Bonne

Granulométrie

La caractérisation de boues de papeterie utilisées dans le cadre d'un projet de recherche fait état d'une granulométrie **inférieure à 90 µm.**

[Source : Récupération et valorisation de la boue de papeterie comme ajout dans les mortiers, B. Rabehi, Y. Ghernouti, *1st International Conference on Sustainable Built Environement Infrastructures in Developing Countries*, ENSET Oran (Algérie), 2009]

Cependant, plus les boues sont déshydratées (et donc agrégées), plus cette granulométrie pourrait évoluer dans le sens « grossier ».

Il est difficile d'estimer l'effet de la réduction de la taille des fibres cellulosiques lors du procédé de recyclage. Cela peut éventuellement entraîner une augmentation de leur surface spécifique, et favoriser leur faculté d'agrégation entre elles. Une étude plus poussée de cet effet pourrait être intéressante.

Granulométrie		
Gamme	**Appréciation quantitative Taille de particules**	**Appréciation qualitative**
0	T < 2 µm	Argileux
1	2 ≤ T < 50 µm	Limoneux
2	50 ≤ T < 2 mm	Sableux
3	T ≥ 2 mm	Grossier

Caractéristiques agronomiques des matériaux

pH

La fiche d'identité des boues de papeterie créée par l'ADEME précise plusieurs valeurs de pH correspondant aux différents types de boues existants :

- **Le pH est en moyenne de 8** pour les boues de désencrage,
- **Il prend la valeur moyenne de 7** pour les boues primaires,
- Un mélange « boues primaires + biologiques » prendra quant à lui une valeur de **7 à 8.**

[Source : fiche identité déchets : boues papeterie ADEME, 2001]

Une valeur fournie pour ce paramètre par des bulletins d'analyse de boues primaires mélangées à des boues biologiques fait état d'un pH de **8,4**, ce qui excède légèrement la fourchette proposée par l'ADEME tout en restant du même ordre de grandeur.

[Source : caractérisation de boues de papeteries (primaires + biologiques), données internes au projet fournies par M. Séré, origine indéterminée]

pH		
Gamme	**Appréciation quantitative Valeurs de pH**	**Appréciation qualitative**
0	pH < 5	Acide
1	5 ≤ pH < 6,5	Acide/neutre
2	6,5 ≤ pH < 7,5	Neutre
3	pH ≥ 7,5	Basique

$CaCO_3$ total

La fiche thématique de l'ADEME caractérise entre autres l'intérêt agronomique des boues produites par l'industrie papetière. Ainsi, on apprend que l**es boues de désencrage** peuvent être utilisées comme **amendement calcique** du fait de leur forte teneur en carbonate de calcium. Aucune valeur chiffrée n'est toutefois délivrée par cette fiche.

Des analyses pour des boues de papeterie primaires mélangées à des boues de papeterie biologiques fournissent les deux valeurs suivantes pour le $CaCO_3$ total : **484** et **478 g/kg**, soit un pourcentage d'environ **48% dans tous les cas**.

[Source : caractérisation de boues de papeteries (primaires + biologiques), données internes au projet fournies par M. Séré, origine indéterminée]

Il semblerait donc que l'on puisse conclure que les boues issues de papeterie tendent à être chargées en $CaCO_3$ dans tous les cas.

Carbonatation

Gamme	Appréciation quantitative Pourcentage de $CaCO_3$	Appréciation qualitative
0	0%	Absente
1	0≤ $CaCO_3$ < 1 %	Faible
2	1 ≤ $CaCO_3$< 10 %	Moyenne
3	$CaCO_3$ ≥ 10 %	Importante

N total

Les analyses disponibles pour le mélange boues primaires + boues biologiques donnent pour valeur **5,28** et **3,61** g /kg, soit en moyenne 0,45% environ.

[Source : caractérisation de boues de papeteries (primaires + biologiques), données internes au projet fournies par M. Séré, origine indéterminée]

Carbone organique

Les analyses disponibles pour le mélange boues primaires + boues biologiques donnent pour valeur **145** et **102** g /kg, soit en moyenne 12% environ.

[Source : caractérisation de boues de papeteries (primaires + biologiques), données internes au projet fournies par M. Séré, origine indéterminée]

CEC

Une estimation de ce paramètre a été faite au cours d'analyses sur des boues primaires associées à des boues biologiques. Les valeurs déterminées sont de **4,56 et 6,72 cmol+/kg.**

[Source : caractérisation de boues de papeteries (primaires + biologiques), données internes au projet fournies par M. Séré, origine indéterminée]

P assimilable

Le Phosphore, mesuré selon méthode d'Olsen, donne une bonne estimation du phosphore assimilable d'un matériau. On trouve une valeur de **0,0125 g/kg** par analyse chimique dans des boues de papeterie primaires et biologiques mélangées.

[Source : caractérisation de boues de papeteries (primaires + biologiques), données internes au projet fournies par M. Séré, origine indéterminée]

P assimilable		
Gamme	**Appréciation quantitative P assimilable (g/kg) préciser méthode d'extraction**	**Appréciation qualitative de la fertilité phosphatée**
0	P < 0,04	Très faible
1	0,04 ≤ P < 0,08	Médiocre
2	0,08 ≤ P < 0,12	Normale/correcte
3	P ≥ 0,12	Elevée

Caractéristiques de dangerosité des matériaux

pH sur éluat

Une valeur de **7,99** a été trouvée pour ce paramètre, au cours de la caractérisation de boues primaires mélangées à des boues biologiques.

[Source : caractérisation de boues de papeteries (primaires + biologiques), données internes au projet fournies par M. Séré, origine indéterminée]

Teneur ou concentration totale en polluants

L'analyse des différents composants chimiques mis en évidence lors de l'analyse de boues biologiques mélangées à des boues primaires a permis de mettre en lumière la présence dans ces boues des polluants suivants :

- **16 HAP : 1,817 mg/kg**
- **Métaux lourds :** tous ponctuellement mesurés, avec en notamment moyenne **46,8 mg/kg de Cuivre, 27,7 mg/kg de Chrome, 12,9 mg/kg de Nickel, 113,6 mg/kg de Zinc…**

- Il sera utile de définir si l'**encre** et les **fibres cellulosiques** sont considérées, dans le contexte de cette étude, comme des polluants. Dans ce cas, les boues de la catégorie 03 03 05 contiennent ces deux polluants. Les boues de papeterie, de façon générique sont chargées en fibres.
- Il sera de plus pertinent de comparer les valeurs ci-dessus aux seuils d'écotoxicité en vigueur.

[Source : caractérisation de boues de papeteries (primaires + biologiques), données internes au projet fournies par M. Séré, origine indéterminée]

Teneur/Concentration totale des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	En trace
2	Contamination possible
3	Contamination fréquente

Disponibilité des polluants

Les métaux lourds seront plus ou moins disponibles en fonction du pH du sol, qui conditionne l'état ionique sous lequel ils se trouvent (leur spéciation).

Disponibilité des polluants (métaux lourds)	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	Très faible/négligeable
2	Possible en différé
3	Possible en immédiat

HAP sont quant à eux peu disponibles **au sein d'un sol**. Ils sont susceptibles d'être transférés vers le compartiment atmosphérique.

[Source : Disponibilité des HAP dans les sols de friches industrielles et influence des conditions rhizosphériques, C. Barnier, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009]

Disponibilité des polluants (HAP)	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	Très faible/négligeable
2	Possible en différé
3	Possible en immédiat

Bibliographie

Ouvrages et documents publiés :

- [Source : Fiche identité déchets : boues papeterie ADEME, 2001]
- [Source : Récupération et valorisation de la boue de papeterie comme ajout dans les mortiers, B. Rabehi, Y. Ghernouti, *1st International Conference on Sustainable Built Environement Infrastructures in Developing Countries*, ENSET Oran (Algérie), 2009]
- [Source : Disponibilité des HAP dans les sols de friches industrielles et influence des conditions rhizosphériques, C. Barnier, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009]

Liens internet :

- [Source : site de l'ADEME : http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?catid=14624]
- [Source : http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3436]

Données issues d'autres acteurs du projet :

- [Source : caractérisation de boues de papeteries (primaires + biologiques), données internes au projet fournies par M. Séré, origine indéterminée]

Déchets de produits en céramique, briques, carrelage et matériaux de construction (après cuisson) : 10-12-08

10 12 08	déchets de produits en céramique, briques, carrelage et matériaux de construction (après cuisson)	Déchets provenant de la fabrication des produits en céramique, briques, carrelage et matériaux de construction :	Déchets provenant de procédés thermiques :

Cette rubrique est susceptible d'inclure :

- D'une part, les casses de carreaux, briques, céramiques lors de la cuisson ;
- D'autre part, les briques, tuiles, céramiques produites par le BTP (il y a donc chevauchement avec les rubriques 17 01 02 : briques issues de la démolition et 17 01 03 : tuiles et céramiques issues de la démolition.

Ainsi cette fiche vaut également pour les rubriques suivantes :

17 01 02	briques	Béton, briques, tuiles et céramiques :	Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
17 01 03	tuiles et céramiques		

Disponibilité

Importance du gisement (tonnage produit par an)

- **Casse de carreaux, briques, céramiques lors de la cuisson** (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009) **:**
  - Au niveau national :
    - 215 000 T/an
  - Au niveau régional :
    - 60 tonnes pour la Vendée, quelques centaines de tonnes pour les Pays de la Loire ;
    - 900 tonnes/an pour l'entreprise RAIRIES MONTRIEUX (49).

- **Briques, tuiles, céramiques produites par le BTP :**
  - Briques, tuiles, céramiques et ardoises : 2 870 000 t/an (SOeS Comissariat au développement durable, 2010) ;
  - Céramiques : 998 300 T/an (ADEME, 1998) ;
  - Céramique, argile et terre cuite : 10 900 T/an (ADEME, 1998) ;
  - Argile et terre cuite : 429 200 T/an (ADEME, 1998) ;
  - Céramiques et terre cuite : 1,5 million de tonnes/an en 2000 (site internet du CTMNC).

Variabilité de la production dans le temps

La production de casses cuites et de déchets de Briques, tuiles, céramiques issues du BTP ne présente pas de saisonnalité.

Répartition du gisement sur le territoire Français

- **Casse de carreaux, briques, céramiques lors de la cuisson** :



(source : FFTB, non daté)

- **Briques, tuiles, céramiques produites par le BTP** : Relativement homogène sur le territoire (issu du renouvellement urbain), mais dépendance à la géologie du secteur.

Existence de filières de valorisation et importance de ces filières

- **Casse de carreaux, briques, céramiques lors de la cuisson** (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009) : Paillage après polissage des débris, remblais pour les chemins des agriculteurs (20 €/m3 pour une commande de 60 m3).

- **Briques, tuiles, céramiques, ardoises produites par le BTP** :
  - 35% dirigés vers les déchetteries (SOeS Comissariat au développement durable, 2010) ;
  - 35 % en comblement de carrières (SOeS Comissariat au développement durable, 2010) ;
  - Les briques sont transformées en granulats dans des installations de concassage; ces granulats sont alors mis en œuvre dans des travaux de fondations, dans des aménagements paysagers de type sentiers et rocailles ou encore pour le revêtement des terrains de tennis (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009).

Provenance urbaine du déchet

- **Casse de carreaux, briques, céramiques lors de la cuisson** : non.

- **Briques, tuiles, céramiques, ardoises produites par le BTP :** oui car lié au renouvellement urbain.

Cadre / Statut réglementaire

Déchet inerte.

Caractéristiques générales des matériaux

Composition

Les produits de terre cuite sont fabriqués à partir d'argile avec parfois des ajouts de minéraux (sable) mais la matière première essentielle demeure l'argile plus communément appelée "terre".
Les matières premières utilisées pour la préparation de la plupart des produits céramiques et terre cuite traditionnels (céramiques, briques, carrelage, etc.) sont généralement (DGRNE, non daté) :

- des mélanges d'argiles (silicates d'alumine – exemple smectite, kaolinite, illite) et/ou de limons, offrant la plasticité à la pâte ;
- du quartz, du sable, des feldspaths, du basalte, de l'andésite, du porphyre, de la chamotte, de la calcite, du schiste, pour fournir la structure à la céramique (squelette), réduire la température de fusion lors de la cuisson (fondant) et réduire la plasticité de la pâte.

Exemple de composition de pâte :

- ***terre cuite : 70 à 85% argiles rouges***
- ***15 à 30% chamotte***

Les terres utilisées pour faire des terres cuites contiennent des éléments en proportions variables :

- ***de la silice (45 à 60 %) ;***
- ***de l'alumine (20 à 40 %) ;***
- ***du fer (0,5 à 6 %) ;***
- ***de la chaux jusqu'à 5 % ;***
- ***d'autres composants, dont des composants organiques quand il s'agit d'une terre grise (avant cuisson).***

De manière plus générale, le terme « céramique » (produits céramiques) s'emploie pour désigner des matières inorganiques (éventuellement avec une certaine teneur en substances organiques), constituées de composés non métalliques et ayant subi un procédé de cuisson qui leur confère des propriétés définitives. Outre les matières à base d'argile, les céramiques actuelles comprennent une multitude de produits dont la teneur en argile est très faible, voire nulle. Une céramique peut être émaillée ou non émaillée, poreuse ou vitrifiée (BREF : Commission Européenne, 2007).
En particulier (DGRNE, non daté) :

- Pour certains produits réfractaires : l'argile est mélangée à des minéraux possédant des propriétés de résistance à la cuisson : la bauxite calcinée, la cyanite, le corindon, du carbure de silicium et du graphite
- Pour la production de produits poreux et de grandes capacités isolantes : des matières organiques (sciures de bois, fibres de cellulose, polystyrène,…) sont ajoutées dans la pâte.
- Pour des raisons de qualité finale des céramiques et terres cuites traditionnelles ou d'esthétique, certains additifs sont mélangés dans la pâte, tels que du carbonate de baryum, des oxydes de titane ou de manganèse.
- Pour améliorer des préparations liquides (barbotine), il est souvent ajouté des liquides organiques (alcools), des défloculants (cations monovalents, silicate de sodium, sels d'ammonium, des acides organiques (oléique, stéarique, benzoïque…)) et des surfactants. Des agents antimoussants sont parfois ajoutés dans les barbotines pour piéger les bulles de gaz présentes dans la phase liquide et favoriser leur élimination.
- Pour les mélanges céramiques et des produits en terre cuite sous forme granulaire et les pâtes à extruder : des plastifiants, des liants et des lubrifiants (alcool polyvinylique, éthylène glycol, glycérine et les acides stéarique et oléique) sont mélangés pour augmenter la flexibilité et la cohésion des mélanges céramiques.
- Les matières intervenant dans la préparation de l'émail sont semblables à ceux intervenant dans la barbotine des produits en céramique. La différence essentielle se situe au niveau de la quantité des fondants et la proportion des oxydes, plus importante dans les émaux.

Humidité/matière sèche, Fraction organique / Fraction minérale / Teneur en matière organique, Granulométrie/texture, Densité, Porosité, Couleur

Les caractéristiques de teneur en matière sèche, de granulométrie, de densité, de porosité des déchets de terre cuite sont dépendantes des opérations de concassage.
Des données de granulométrie et densité ci-dessous sont fournies dans le Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al. (2009).

Paramètre	Valeur min	Valeur max	Références
Granulométrie (mm)	50	100	Entreprise Rairies Montrieux, 49430 Les Rairies Dominique Rioux : 02-41-21-15-37, d.rioux@montrieux.fr
Densité apparente	1,3	1,9	

Caractéristiques de dangerosité des matériaux (présence de substances, impacts)

Karius et Hamer (2001) fournissent des données de teneurs, en éléments majeurs et traces, sur brut et éluat, pour 9 échantillons concassés de briques issues de briqueteries européennes et disponibles sur le marché (B1 à B9)

- Teneurs en éléments majeurs et trace sur brut :

Table 1
Total content of the sediment brick (SB) made from 50% wt. harbour sediment, harbour sediment (HS) and nine commercial bricks (B1-B9, type: face bricks)

	Unit	SB	HS	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
Na	[g/kg]	5.4	4.6	3.8	2.9	4.8	5.0	3.1	5.9	1.8	3.4	2.5
Mg	[g/kg]	9.1	8.4	4.2	4.7	7.5	7.9	5.9	6.6	2.4	6.1	6.2
Al	[g/kg]	96	53	57	78	77	80	88	51	89	91	66
K	[g/kg]	27	17	17	20	24	25	23	17	16	23	18
Ca	[g/kg]	19	20	3.2	2.5	4.2	4.4	6.3	15	2.0	6.2	17
Fe	[g/kg]	54	45	33	43	40	41	41	30	73	44	30
S as SO_4	[g/kg]	3.2	12	< 0.50	< 0.50	< 0.50	< 0.50	1.8	< 0.50	< 0.50	1.7	< 0.50
V	[g/kg]	0.14	0.082	0.074	0.10	0.10	0.10	0.13	0.061	0.12	0.12	0.093
Cr	[g/kg]	0.16	0.13	0.067	0.10	0.091	0.094	0.10	0.068	0.19	0.087	0.086
Mn	[g/kg]	0.96	1.39	0.48	0.37	1.5	1.4	26	14	19	2.5	0.26
Ni	[mg/kg]	69	60	26	32	49	48	68	37	57	60	35
Cu	[mg/kg]	71	87	16	22	32	82	38	22	32	33	21
Zn	[g/kg]	0.45	0.79	0.073	0.075	0.093	0.094	0.10	0.095	0.37	0.073	0.080
As	[mg/kg]	18	20	16	15	14	14	17	14	11	14	11
Sr	[g/kg]	0.17	0.19	0.068	0.064	0.15	0.14	0.16	0.12	0.12	0.15	0.14
Mo	[mg/kg]	0.82	2.5	< 0.26	< 0.26	< 0.26	< 0.26	2.8	< 0.26	0.50	< 0.26	< 0.26
Cd	[mg/kg]	2.0	6.5	0.70	< 0.019	0.10	0.30	0.70	0.20	< 0.019	< 0.019	< 0.019
Ba	[g/kg]	2.8	0.64	0.36	0.34	1.0	1.0	2.8	0.54	2.0	2.8	2.7
Pb	[g/kg]	0.092	0.16	0.021	0.024	0.025	6.4	0.028	0.034	0.20	0.022	0.019

- Teneurs en éléments majeurs et trace sur éluat, après lixiviation à pH imposé (L/S=10, 24h et pH=4) :

Table 4
Leachability of major and trace elements of the sediment brick (SB) made from 50% wt. harbour sediment, harbour sediment (HS) and nine commercial bricks (B1-B9, type: face bricks) at pH 4 in the pH-static test

	Unit	SB	HS	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
Grain size	[µm]	125–1000	Grounded	125–1000	125–1000	125–1000	125–1000	125–1000	125–1000	125–1000	125–1000	125–1000
Na	[g/kg]	0.0098	0.36	0.010	0.0042	0.013	0.012	0.0053	0.017	0.0058	0.0072	0.0028
Mg	[g/kg]	0.055	1.4	0.0026	0.0026	0.0097	0.0087	0.016	0.13	0.0029	0.018	0.0032
Al	[g/kg]	0.038	0.026	0.010	0.011	0.0085	0.010	0.018	0.11	0.015	0.019	0.013
Si	[g/kg]	0.12	0.39	0.025	0.025	0.027	0.029	0.055	0.24	0.031	0.061	0.026
K	[g/kg]	0.13	0.26	0.14	0.13	0.12	0.13	0.13	0.12	0.15	0.14	0.13
Ca	[g/kg]	1.8	14	0.010	0.0053	0.028	0.028	0.79	2.8	0.011	0.88	0.025
Fe	[g/kg]	0.00028	0.18	0.014	0.015	0.0058	0.0073	0.0012	0.00050	0.090	0.0046	0.0075
S as SO_4	[g/kg]	2.6	4.1	0.0085	0.0029	0.0093	0.0086	1.5	0.075	0.0084	1.6	0.0088
V	[mg/kg]	2.8	0.0099	0.014	0.0068	0.24	0.19	0.27	0.88	0.0055	0.55	0.20
Cr	[mg/kg]	0.10	0.043	0.041	0.055	0.049	0.051	0.077	0.062	0.062	0.053	0.052
Mn	[mg/kg]	4.5	501	2.4	2.5	3.6	3.6	27	24	33	12	1.2
Ni	[mg/kg]	0.10	6.20	0.064	0.11	0.10	0.10	0.18	0.17	0.20	0.13	0.079
Cu	[mg/kg]	0.24	0.55	0.18	0.15	0.15	0.15	0.14	0.10	0.17	0.15	0.19
Zn	[mg/kg]	0.41	314	0.46	0.17	0.17	0.16	0.93	0.34	0.82	0.64	0.34
As	[mg/kg]	2.4	0.013	0.0056	0.00090	0.20	0.18	0.40	0.18	0.0051	1.3	0.63
Sr	[mg/kg]	6.4	57	0.11	0.067	0.26	0.25	3.3	4.5	0.26	4.2	0.19
Mo	[mg/kg]	0.33	< 0.0031	< 0.0031	< 0.0031	0.010	0.0084	0.045	0.054	< 0.0031	0.050	0.022
Cd	[mg/kg]	0.010	1.9	< 0.00032	0.00059	0.00053	0.00058	0.00072	0.0030	< 0.00032	< 0.00032	< 0.00032
Ba	[mg/kg]	2.2	8.0	0.59	0.54	1.7	1.7	1.3	1.9	2.8	1.7	4.1
Pb	[mg/kg]	0.011	0.12	0.016	0.025	0.018	0.017	0.0050	0.0024	0.14	0.0024	0.017

Richer (2001) présente les résultats d'essais de lixiviation ou lessivages réalisés par l'ADEME sur des matériaux en terre cuite issus de la démolition. Ces résultats figurent dans le tableau ci-dessous extrait du rapport BRGM de Richer.

Résultats obtenus après lixiviation ou lessivage
(par application du protocole provisoire de lixiviation des déchets massifs et solidifiés : protocole SRETIE - Novembre 1991)
ADEME

(par protocole SRETIE - Noven

MME INERTES					
Paramètres mesurés	Unité (1)	Brique perforée	Brique plaine	Tuile	Limite de détection
conductivité	S/cm	132	16,7	13	
Humidité	% brut	0,2	1,3	0,04	
F.soluble	% LG	0,13	< 0,1	0,12	
COT	mg/kg de MS	30-70	< 61	60-100	2 mg/L
DCO	mg/kg de MS	< 300	< 305	370-570	10 mg/L
As	mg/kg de MS	0,18-0,23	< 0,15	< 0,15	5 µg/L
Cd	mg/kg de MS	< 0,03	< 0,034	0,017-0,03	1 µg/L
Cr	mg/kg de MS	< 0,3	< 0,3	< 0,3	10 µg/L
Cr6	mg/kg de MS	< 0,3	< 0,3	< 0,3	10 µg/L
Cu	mg/kg de MS	< 0,3	< 0,3	< 0,3	10 µg/L
Hg	mg/kg de MS	< 0,015	< 0,003	< 0,015	0,5 µg/L
Ni	mg/kg de MS	< 0,3	< 0,3	< 0,3	10 µg/L
Pb	mg/kg de MS	< 0,3	< 0,3	< 0,3	10 µg/L
Sn	mg/kg de MS	< 0,3	< 0,3	< 0,3	10 µg/L
V	mg/kg de MS	< 0,3	< 0,3	< 0,3	10 µg/L
Zn	mg/kg de MS	0,5-0,7	0,91	< 0,6	20 µg/L
Fluoranthène	mg/kg de MS				10 µg/L
Benzo b Fluoranthène	mg/kg de MS				10 µg/L
Benzo k Fluoranthène	mg/kg de MS				10 µg/L
Benzo a Pyrène	mg/kg de MS				10 µg/L
Benzo ghr pérylène	mg/kg de MS				20 µg/L
	mg/kg de MS				20 µg/L
Phénols	mg/kg de MS				50 µg/L
Ca	mg/kg de MS		< 30		1 mg/L
Al	mg/kg de MS	0,42	0,3	0,21	3 µg/L
Fe	mg/kg de MS	< 3	< 3	< 3	50 µg/L
Ti	mg/kg de MS	< 1,5		< 1,5	50 µg/L
Hydrocarbones totaux	mg/kg de MS				0,1 mg/L
Sulfates	mg/kg de MS				1 mg/L
Sulfures	mg/kg de MS				0,5 mg/L
Mn	mg/kg de MS	0,12		0,015-0,02	0,5 µg/L

(1) : l'unité r

Caractéristiques strictement agronomiques des matériaux

Les caractéristiques de fertilité physiques sont dépendantes du concassage effectué sur le déchet.

- **Casse de carreaux, briques, céramiques lors de la cuisson :**

Les teneurs en certains éléments majeurs et traces sont présentées dans les tableaux en section 3.
Une appréciation du pH des matériaux en terre cuite est fournie dans le Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al. (2009) :

Paramètre	Valeur min	Valeur max	Références
pH	Neutre		Entreprise Rairies Montrieux, 49430 Les Rairies Dominique Rioux : 02-41-21-15-37, d.rioux@montrieux.fr

Caractéristiques strictement mécaniques des matériaux

Les caractéristiques de résistance à la fragmentation et de résistance à l'attrition et l'usure des granulats de briques concassées sont identiques à celles de granulats en général (Coefficient de Los Angeles entre 15 et 60 ; Coefficient Micro-Deval en présence d'eau entre 10 et 50) (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009).
La terre cuite est un matériau fragile (site internet du CTMNC) :

- Résistance à la compression : elle varie selon le tesson, la géométrie, la porosité et l'orientation. Les résistances à la compression des briques varient entre 10 et 50 MPa. Celles du tesson lui-même sont environ de 17 à 83 MPa. A porosité égale, la résistance à la compression augmente avec le contenu en chaux.
- Résilience : On indique pour une brique porosée avec une densité de 1 500 kg/m3 des résiliences de 0,3 à 0,5 MPa m0,5. Une autre terre cuite a donné 0,8 MPa m0,5.
- Dureté : La dureté Vickers de la terre cuite dépend de la porosité, avec des duretés de l'ordre de 3 GPa à 5 % de porosité, tombant à 0,5 GPa à 35 % de porosité.

Bibliographie :

ADEME (1996) Comportement à la lixiviation de matériaux considérés comme inertes et de produits naturellement exposés à l'action de l'eau.
Carrillo L., Emile F., Castaldi G., Perrin B. et Wagner C. (2009). Matériaux minéraux potentiellement utilisables en espaces verts : matériaux alternatifs pour les mélanges Terre-Pierre établis à partir de la classification européenne des déchets. Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest.
SOeS Commissariat gal au développement durable, Chiffres & statistiques N°164 octobre 2010.
ADEME (1998) Guide Ademe "déchets du bâtiment" volume 1.
Site internet du Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction CTMNC : http://www.ctmnc.fr/wiki/index.php/Propri%C3%A9t%C3%A9s_environnementales.
Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement-DGRNE (non daté) Guide méthodologique pour l'Evaluation des Incidences sur l'Environnement. Fabrication de produits céramiques, Région Wallonne.
Commission Européenne (2007) Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour la fabrication de produits céramiques (BREF).
Fédération Française des tuiles et briques – FFTB (non daté), La terre cuite : un matériau intemporel, une industrie innovante, Brochure.
Karius V. et Hamer K. (2001) pH and grain-size variation in leaching tests with bricks made of harbour sediments compared to commercial bricks, The Science of The Total Environment, Volume 278, Issues 1-3, 20 October 2001, Pages 73-85.
Richer G. avec la collaboration de Carbonnier P., Koch-Mathian J.-Y. (2001) Matériaux de démolition en région Nord-Pas-de-Calais : Recommandations de stockage et de recyclage, Rapport BRGM/RP-50604-FR, 54 p.

Déchets de préparation avant cuisson : 10-13-01

10 13 01	déchets de préparation avant cuisson	Déchets provenant de la fabrication de ciment, chaux et plâtre et d'articles et produits dérivés	Déchets provenant de procédés thermiques

La fabrication de ciment et de plâtre nécessite des produits sous forme de poudre : on peut donc penser que les déchets avant cuisson seront en quantité très faible.

La fabrication de chaux n'utilise que des produits dont le diamètre est supérieur à une certaine valeur qui varie selon les performances des fours. Les déchets seront constitués par des granulés de calcaires dont le diamètre est jugé trop faible. Dans la suite de cette fiche bibliographique, nous ne nous intéresserons donc qu'aux propriétés du **calcaire sous forme de granulés**.

Fabrication de chaux : chalins, sous-produit de concassage des pierres, matériau calcaire, granulométrie 0-30 mm.

Caractéristiques physiques des matériaux

Portance

Pas de données obtenues concernant la portance.

Conductivité des lixiviats

Pas de données obtenues concernant la conductivité des lixiviats.

Densité apparente

La densité apparente est comprise entre 2,3 et 2,9x10^3 kg.m^{-3} (Chapellier D., Mari J-L).

Masse volumique réelle des sables dont la fraction granulométrique est supérieure à 80 µm pour les carrières étudiées (Achour, 2007) :

Origine[6]	Masse volumique réelle (t/m^3)
Aïn Tebournouk	2,63
Nahli	2,55
El Haoureb	2,76
Jbel Ressas	2,67
Jradou	2,638

Conclusion :

La densité apparente est estimée entre 2,3 et 2,9x10^3 kg.m^{-3}. Les deux références se recoupent sur cette fourchette.

Perméabilité à l'eau

Le calcaire fissuré peut atteindre une perméabilité de 1m/j (Institut français de l'éducation).

Cependant, le calcaire étudié doit être plus perméable car il est sous forme de grains grossiers.

[6] Les carrières étudiées sont des carrières de calcaire. Les calcaires issus de ces carrières sont destinés à la fabrication de béton et sont donc étudiés sous forme de granulats.

Conclusion :

Perméabilité à l'eau		
Gamme	**Appréciation quantitative Ks (m/s)**	**Appréciation qualitative**
0	$10^{-2} \leq Ks < 10^{-4}$	Perméable
1	$10^{-4} \leq Ks < 10^{-7}$	Semi perméable
2	$10^{-7} \leq Ks < 10^{-10}$	Imperméable
3	$Ks \geq 10^{-10}$	Très imperméable

Structure (agrégation)

Aucune donnée n'a été trouvée concernant une éventuelle structure du calcaire en granules.

Structure	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Bonne

Granulométrie

Le calcaire jugé trop fin a un diamètre inférieur à 30 mm (10 parfois).

Granulométrie		
Gamme	**Appréciation quantitative Taille de particules**	**Appréciation qualitative**
0	T < 2 µm	Argileux
1	2 ≤ T < 50 µm	Limoneux
2	50 ≤ T < 2 mm	Sableux
3	T ≥ 2 mm	Grossier

Caractéristiques agronomiques des matériaux

pH

Les 11 carrières sur roches calcaires (dures et tendres) sont homogènes vis-à-vis du pH, avec un pH moyen de 8,3 (minimum : 7,8, maximum : 8,7) (Lansiart, 2008).

Conclusion :

pH		
Gamme	**Appréciation quantitative Valeurs de pH**	**Appréciation qualitative**
0	pH < 5	Acide
1	5 ≤ pH < 6,5	Acide/neutre
2	6,5 ≤ pH < 7,5	Neutre
3	pH ≥ 7,5	Basique

$CaCO_3$ total

La matière première pour la fabrication de la chaux est le calcaire (pierre à chaux) ou, dans une moindre mesure, la dolomie ou le calcaire dolomitique.
De manière générale, le calcaire contient plus de 90 % de $CaCO_3$ et un faible pourcentage de $MgCO_3$. La dolomie est un carbonate double qui contient entre 54 et 58 % de $CaCO_3$ et de 40 à 44 % de $MgCO_3$. Le terme de « calcaire dolomitique » désigne habituellement un calcaire dont la teneur en $MgCO_3$ est supérieure à celle du calcaire, mais moindre que celle de la dolomie (BREF industrie ciment, chaux, magnésie).
Teneur en $CaCO_3$ dans les calcaires des carrières tunisiennes (Achour, 2007) :

Origine	**Teneur en $CaCO_3$ (%)**
Jressas	94-97
Nahli	84-94

Conclusion :

Carbonatation		
Gamme	**Appréciation quantitative Pourcentage de $CaCO_3$**	**Appréciation qualitative**
0	0%	Absente
1	0≤ $CaCO_3$ < 1 %	Faible
2	1 ≤ $CaCO_3$< 10 %	Moyenne
3	$CaCO_3$ ≥ 10 %	Importante

N total

Pas de donnée trouvée sur la teneur en azote total.

Carbone organique

Pas de donnée trouvée sur la teneur en carbone organique du calcaire.

CEC

Pas de données trouvées concernant la CEC.

P assimilable

Pas de données obtenues concernant le P assimilable.

Caractéristiques de dangerosité des matériaux

pH sur éluat

Pas de données obtenues concernant le pH sur éluat.

Teneur ou concentration totale en polluants

La quantité d'impuretés ou d'éléments traces ainsi que la teneur en carbonate sont particulièrement importantes car elles déterminent si le calcaire convient à de multiples applications. Le Tableau ci-dessous donne la liste des impuretés ou d'éléments traces généralement présents dans le calcaire avec leurs teneurs habituelles.
Teneur en polluants dans les roches calcaires (BREF ciment, chaux, magnésie, 2010) :

Impuretés ou métaux	Unité	Teneur habituelle
Silice (sous forme de SiO2)	%	0,1 – 2,0
Alumine (sous forme de Al2O3)	%	0,04 – 1,5
Fer (sous forme de Fe2O3)	%	0,02 – 0,6
Soufre (S)	%	0,0024 – 0,118
Substances carbonées	%	0,01 – 0,5
Manganèse (sous forme de MnO2)	mg/kg	20 – 1000
Antimoine	mg/kg	0,1 – 3
Arsenic	mg/kg	0,1 – 15
Bore	mg/kg	1 – 20
Cadmium	mg/kg	0,1 – 1,5
Chrome	mg/kg	3 – 15
Cuivre	mg/kg	1 – 30
Plomb	mg/kg	0,5 – 30
Mercure	mg/kg	0,02 – 0,1
Molybdène	mg/kg	0,1 – 4
Nickel	mg/kg	0,5 – 15
Sélénium	mg/kg	0,02 – 3
Argent	mg/kg	0,2 – 4
Etain	mg/kg	0,1 – 15
Vanadium	mg/kg	1 – 20
Zinc	mg/kg	3 – 500

Toutefois, en ce qui concerne la production de chaux hydraulique naturelle, les matières premières utilisées contiennent entre 65 et 90 % de CaCO3 et de MgCO3. La pureté de ces matières premières est différente de celle des éléments employés dans la production d'autres types de chaux. De plus, la teneur en matières organiques, exprimée en COT, est bien supérieure et comprise entre 0,8 et 5 % (BREF ciment, chaux, magnésie, 2010).

Valeurs-guides utilisées par la Sous-Commission de la Toxicité des Matières Fertilisantes et des Supports de Culture pour le calcaire (54 % de CaO) (Conseil supérieur d'hygiène publique de France, 1998) :

Polluant	Teneur (ppm de produit brut)
Cd	0,011
Hg	0,048
Pb	3,91
Cr	-
Cu	16
Ni	-
Se	-
Zn	80
As	1,28
Mo	1,62

Conclusion :

Des polluants peuvent donc être présents en très faible quantité dans le calcaire.

Teneur/Concentration totale des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	En trace
2	Contamination possible
3	Contamination fréquente

Les données collectées sont issues du BREF, elles constituent une bonne base de données.

Disponibilité des polluants

Si les impuretés ou les éléments traces sont présents de manière hétérogène, il est généralement possible d'en éliminer certains par des techniques sélectives d'extraction, de lavage ou de tamisage. Lorsque les impuretés sont en revanche uniformément réparties dans la roche, ces procédés sont inefficaces (BREF ciment, chaux, magnésie, 2010).

Il n'a pas été possible de déterminer si les polluants étaient disponibles dans des conditions naturelles.

Bibliographie

ACHOUR T. (2007) Étude de l'influence de la nature des granulats sur les propriétés des bétons hydrauliques : cas des granulats calcaires tunisiens, http://www.scd.uhp-nancy.fr/docnum/SCD_T_2007_0105_ACHOUR.pdf

Chapellier D. et Mari J.-L. (non daté) Cours online de géophysique de l'université de Lausanne, principes de base.

Commission Européenne (2010) Industries du ciment, de la chaux et de la magnésie, document de référence sur les meilleures techniques disponibles (BREF).

Conseil supérieur d'hygiène publique de France (1998) Risques sanitaires liés aux boues d'épuration des eaux usées urbaines, Ed. Tec & Doc.

Institut français de l'éducation (non daté) Etude de la porosité et de la perméabilité, http://acces.inrp.fr/eduterre-usages/nappe/html/scenarii/TP/tp1.htm, consulté le 01/02/12

Lansiart M. (2008) Evaluation des impacts environnementaux des carrières : avancement des travaux, synthèse 2005-2007, janvier 2008, BRGM, BRGM/RP-56126-FR.

Mania J., Broquet P. et Rampnoux N. (1998) Rôle de la fracturation dans la détermination de la conductivité hydraulique des calcaires, apport des méthodes directes et indirectes, Bulletin de la Société Géologique de France, vol. 169, pp. 765-773.

Déchets issus de la fabrication de la chaux/plâtre/ciment: déchet de calcination et d'hydratation de la chaux: 10-13-01

10 13 04	déchets de calcination et d'hydratation de la chaux	Déchets provenant de la fabrication de ciment, chaux et plâtre et d'articles et produits dérivés	Déchets provenant de procédés thermiques

La calcination du calcaire peut produire de la chaux (co-produit) d'une granulométrie et d'un niveau de décarbonation qui ne correspondent pas toujours aux exigences du marché. Cette chaux (co-produit) peut être recueillie directement à la sortie du four au cours des procédures de démarrage et d'arrêt ou par le criblage ou le dépoussiérage des gaz résiduaires. Cette chaux (co-produit) représente 1 à 5 % de la production annuelle totale (BREF ciment, chaux, magnésie, Commission Européenne).

La chaux recueillie à la sortie du four est une chaux vive (CaCO) ; cependant, elle est très réactive à l'eau et forme une chaux éteinte (Ca(OH)2) après hydratation. Les propriétés de ces deux types de chaux sont présentées dans cette fiche.

Caractéristiques physiques des matériaux

Portance

La chaux est utilisée comme liant dans les remblais routiers : elle augmente l'indice portant immédiat des matériaux (Loïc, 2006).
Pas de données chiffrées obtenues pour ce paramètre.

Conductivité des lixiviats

Pas de données obtenues sur ce paramètre.

Densité apparente

Masse volumique apparente : la masse volumique exprimée en tonne par mètre cube et la densité sont indiquées par le même chiffre (Ecole d'Avignon, 2002).

Liants minéraux	**Masse volumique apparente (en kg/m^3)**	**Densité**
Chaux vive	800 - 1000	0,8 – 1
Chaux aérienne	490 - 700	0,49 – 0,7
Chaux hydraulique naturelle	700 - 1000	0,7 – 1

	Faiblement cuite	**Moyennement cuite**	**Fortement cuite**
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,5 – 1,8	1,8 – 2,2	> 2,2

Tableau présentant la masse volumique apparente (Seidel/Huckauf/Stark)

Généralement, la densité apparente des chaux vives commerciales se situe entre 700 et 1 200 kg/m^3 alors que celle des chaux éteintes est comprise entre 300 et 600 kg/ m^3 (Jacques, 1990).

La densité apparente des particules de chaux vive est comprise entre 1,6 et 2,8, selon le degré de porosité ou, à l'inverse, de frittage des particules. La réaction d'hydratation entraîne une diminution de la densité apparente jusqu'à des valeurs de l'ordre de 0,4 à 0,55 (Pelletier, Puatti, Herrier, 2010).

Conclusion :

La densité apparente de la chaux vive se situe dans une fourchette de 700 à 1200 kg.m^{-3}, celle de la chaux éteinte est plus faible (comprise entre 300 et 600 kg.m^{-3}). Plusieurs sources se recoupent sur ces valeurs, cependant des densités apparentes plus élevées sont répertoriées pour la chaux vive, selon la cuisson notamment.

Perméabilité à l'eau

Pas de donnée concernant la perméabilité à l'eau.

La chaux en faible quantité est dissoute dans l'eau.
Quantité de chaux dissoute dans 100 g de solution :

T°C	Chaux vive CaO	Chaux éteinte $Ca(OH)_2$
0	0,14	0,185
10	0,133	0,176
20	0,125	0,165
30	0,120	0,159
40	0,116	0,153
50	0,106	0,140
60	0,097	0,128
70	0,088	0,116
80	0,0789	0,104
90	0,061	0,081
100	0,054	0,071

La solubilité de la chaux à température ambiante (10-30°C) est de l'ordre de 0,11 à 0,13 g pour 100 g de solution saturée ; elle augmente à plus faible température. Lorsque la teneur en chaux augmente et dépasse le taux de saturation, la chaux en excès passe en suspension, sous forme de lait de chaux.

Les chaux sont perméables à la vapeur d'eau (Ecole d'Avignon, 2002).

Données de porosité (Seidel/Huckauf/Stark, 1980) :

	Faiblement cuite	Moyennement cuite	Fortement cuite
Porosité totale (%)	46 – 55 %	34-46	<34

La porosité des grains est dépendante à la fois de celle du calcaire de départ et des conditions de sa calcination. Elle peut varier dans une gamme de 25 à 55 % (Pelletier, Puatti, Herrier, 2010).

Structure (agrégation)

Pas de données concernant une possible structure de la chaux.

Granulométrie

Pas de données concernant la granulométrie de la chaux qui est déclassée.

Caractéristiques agronomiques des matériaux

pH

La chaux aérienne est un produit basique. Ainsi, sa dissolution dans l'eau provoque une augmentation de pH jusqu'à 12,4 dans le cas d'une solution saturée à 25°C. L'ajout d'une trace de chaux peut provoquer une brusque augmentation du pH (de 7 à 11) d'une eau distillée (Jacques, 1990).

Conclusion :

La chaux est un produit fortement basique : bien qu'une seule source ne soit citée, il est clair que ce produit doit être classé dans les produits basiques.

pH		
Gamme	**Appréciation quantitative Valeurs de pH**	**Appréciation qualitative**
0	pH < 5	Acide
1	5 ≤ pH < 6,5	Acide/neutre
2	6,5 ≤ pH < 7,5	Neutre
3	pH ≥ 7,5	Basique

$CaCO_3$ total

Contrairement à la chaux vive, la chaux hydratée est capable de fixer le dioxyde de carbone de l'air, en atmosphère humide, pour donner du carbonate de calcium selon la réaction suivante :

$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$

Conclusion :

Pas de donnée précise concernant la quantité de $CaCO_3$ reformée dans la chaux hydratée.

N total

Pas de donnée trouvée sur la teneur en azote total.

Carbone organique

Aucune donnée obtenue concernant la présence de carbone organique dans la chaux : étant donnée l'origine minérale de la chaux, il est cependant raisonnable de formuler l'hypothèse de **l'absence de carbone organique dans la chaux.**

CEC

Aucune valeur trouvée pour ce paramètre.

P assimilable

La chaux pure ne contient pas de P assimilable.

La chaux contient une fertilité phosphatée nulle.

P assimilable		
Gamme	**Appréciation quantitative P assimilable (mg/kg) préciser méthode d'extraction**	**Appréciation qualitative de la fertilité phosphatée**
0	P < 0,04	Très faible
1	0,04 ≤ P < 0,08	Médiocre
2	0,08 ≤ P < 0,12	Normale/correcte
3	P ≥ 0,12	Elevée

Caractéristiques de dangerosité des matériaux

pH sur éluat

La chaux est dissoute selon la réaction :

$$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2\ OH^-$$

(http://www.concretecorrosion.net/html/mecanism/lixivi.htm).

Conclusion :

Le pH de l'éluat de chaux serait fortement basique selon la formule proposée ci-dessus.

Teneur ou concentration totale en polluants

Les éléments étrangers que l'on peut détecter dans une chaux sont directement dépendants de la pureté de la pierre calcaire extraite du gisement. Elle peut contenir des oxydes de magnésium mais aussi d'autres éléments présents en quantité variable : le silicium, le fer, le soufre qui peuvent provenir du calcaire ou du combustible utilisé pour la calcination. D'autres éléments moins abondants (traces) sont spécifiques de la composition du calcaire originel.

Conclusion :

Aucune donnée ne prouve l'absence complète de polluants mais leur présence semble être en très faibles quantités.

Teneur/Concentration totale des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	En trace
2	Contamination possible
3	Contamination fréquente

Disponibilité des polluants

Les métaux toxiques et particulièrement les métaux lourds contenus dans les boues ou les eaux polluées peuvent être rendus insolubles par adjonction de chaux. Cette méthode permet de précipiter sous forme d'hydroxydes les ions métalliques tels que l'argent, l'arsenic, le baryum, le cadmium, le cobalt, le cuivre, le mercure, le manganèse, le nickel, le plomb, le zinc. Chaque métal possède une gamme de pH optimal pour laquelle la concentration restante en solution est minimale (Pelletier, Puatti, Herrier, 2010).

Conclusion :

La chaux semble retenir une partie des polluants. Etant donné que la chaux ne contient que des traces de polluants, les polluants disponibles le sont en très faibles quantités.

Disponibilité des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	Très faible/négligeable
2	Possible en différé
3	Possible en immédiat

Remarque : la chaux est un produit irritant pour les voies respiratoires et pour la peau en présence d'humidité (Pelletier, Puatti, Herrier, 2010).

Bibliographie

Commission Européenne (2010) Industries du ciment, de la chaux et de la magnésie, document de référence sur les meilleures techniques disponibles (BREF) http://www.concretecorrosion.net/html/mecanism/lixivi.htm

Cours matériaux, Institut universitaire de technologies Grenoble 1, http://iut-tice.ujf-grenoble.fr/tice-espaces/GC/materiaux/mtx3/CoursMateriaux/8.8.pdf

Ecole d'Avignon (2002) Techniques et pratique de la chaux, Ed. Eyrolles, 9eme tirage.
Jacques C. (1990) La chaux, ses utilisations, Ed. Balthazard et Cotte / Techno-Nathan.
Loïc G. (2006) Stabilisation à la chaux et au ciment, Techni.ch.
Pelletier M., Puiatti D., Herrier G. (2010) Chaux aérienne- Contexte, fabrication, domaines applicatifs, Techniques de l'ingénieur, 10 février 2010.
Seidel, Huckauf et Stark (1980) Technologie des ciments, chaux, plâtre, Ed. SEPTIMA-Paris.

Pneus hors d'usage : 16-01-03

16 01 03	pneus hors d'usage	Véhicules hors d'usage de différents moyens de transport (y compris machines tous terrains) et déchets provenant du démontage de véhicules hors d'usage et de l'entretien de véhicules (sauf chapitres 13, 14 et sections 16 06 et 16 08)	Déchets non décrits ailleurs dans la liste :

Pneumatiques de véhicules (véhicules légers (VL), poids lourds (PL), scooters (SC), véhicules agraires et de génie civil (AGRI-GC1), engins lourds de génie civil (GC2) ou avions (AV)) ne pouvant être réchappés puis vendus comme pneumatiques d'occasion.
Cette rubrique est susceptible d'inclure (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009 ; site internet ALIAPUR ; site internet Draingom) :

- **Pneumatiques usagés entiers :** Pneumatiques de véhicules[7], ne pouvant être réchappés puis vendus comme pneumatiques d'occasion, et utilisés sans traitement préalable (site Internet d'ALIAPUR).
- **Pneumatiques usagés découpés ou fragmentés :** Granulats provenant d'un broyage de la gomme des pneumatiques de véhicules[8], ne pouvant être réchappés puis vendus comme pneumatiques d'occasion, après extraction des fibres textiles et des fils métalliques contenus dans les pneus. La taille des granulats varie de 0,8 à 20 mm.
- **Pneumatiques usagés fragmentés puis compostés.**
- **Pneumatiques usagés transformés** : Ce produit, à base de pneus usagés, est commercialisé sous le nom générique de DRAINGOM®. Il correspond à la norme AFNOR : XP T 47-751 de juillet 2006. DRAINGOM est constitué par un volume rempli de plaquettes de caoutchouc de forme convexe, d'un calibre de 50 à 150 mm, issues cisaillement de pneus usagés. Ce procédé existe depuis 9 ans.

Importance du gisement (tonnage produit par an)

En 2009 (ADEME, 2010) :

- 359 227 T de pneus ont été mis sur le marché (baisse de 6,4 % par rapport à l'année 2008), 70,6 % sont des pneus de véhicules légers ;
- 389 373 T de pneus ont été éliminés, d'après les déclarations des producteurs, 344 777 T selon les éliminateurs ;
- Sur ces 389 373 T de pneus, 62 022 T (15,9 %) ne sont pas disponibles en tant que déchet valorisable car ils ont été réchappés ou ont été revendus comme pneus d'occasion.

Le taux de collecte en 2009 des pneus usagés mis sur le marché en 2008 est de 95 % (ADEME, 2010).
En 2009, 35 % des pneus collectés ont été exportés, majoritairement sur le marché de l'occasion (ADEME, 2010).

Variabilité de la production dans le temps

A priori, pas de variation saisonnière du gisement.

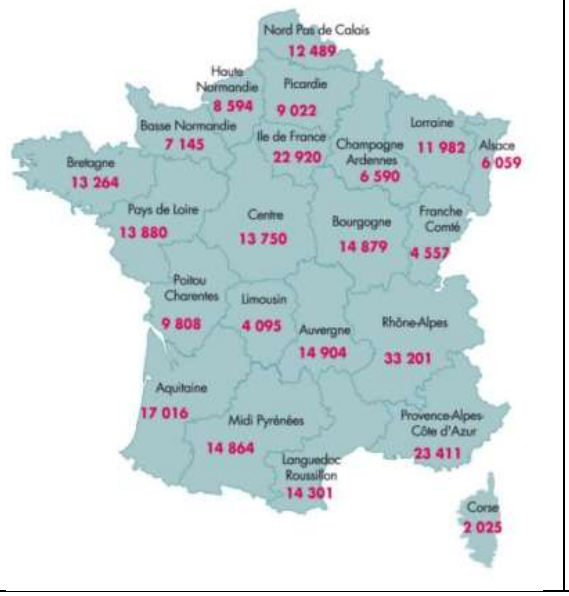
Répartition du gisement sur le territoire Français

Bonne répartition du gisement de pneus usagés sur le territoire français, représenté par une cartographie des tonnages collectés relativement homogène.

Site internet ALIAPUR	*ADEME, 2010*
Répartition géographique des tonnages collectés par ALIAPUR (plus de 74 % du marché du recyclage des	*Répartition géographique des tonnages ramassés en 2009*

[7] Véhicules légers (VL), poids lourds (PL), scooters (SC), véhicules agraires et de génie civil (AGRI-GC1), engins lourds (GC2) ou avions (AV)
[8] Véhicules légers (VL), poids lourds (PL), scooters (SC)

pneumatiques) en 2010



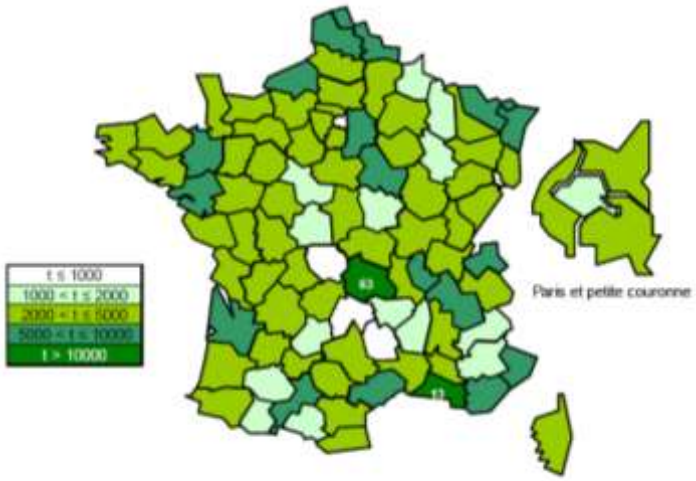


Figure 17 : Répartition géographique des tonnages ramassés en 2009

Existence de filières de valorisation et importance de ces filières

Pneus en général : Ces matériaux peuvent être utilisés (ADEME, 2010 ; Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009) :

- comme combustibles par exemple en cimenterie ou chaudière industrielle ou être incinérés avec récupération d'énergie ;
- pour la fabrication de déchiquetas, granulats ou poudrette dans des applications du type construction de terrains de sport, tapis de sol, etc.) ou utilisation en aciéries et fonderies ;
- dans les Travaux Publics ou le Génie Civil, ou encore pour des travaux de remblaiement.

D'autres utilisations, du type utilisation de pneus pour le maintien des bâches d'ensilage par exemple, sont également recensées.

Sur les 389 373 T de pneus usagés éliminés en 2009 (ADEME, 2010) :

- 15,9 % ont été réutilisés en occasion ou rechapage ;
- 37,8 % ont été utilisés en combustion / incinération ;
- 24,8 % sont partis en granulation ;
- 19,7 % ont été utilisés dans les Travaux Publics ou le Génie Civil, ou encore pour des travaux de remblaiement ;
- 1,5 % ont été utilisés en aciéries et fonderies ;
- 0,3 % ont été utilisés pour le maintien des bâches d'ensilage ou autres.

Deux grandes entreprises collectent et gèrent les pneus usagés en France : ALIAPUR (plus de 74 % du marché du recyclage des pneumatiques) et France Recyclage Pneumatique (14%). Il existe aussi une association qui a pour objectif la résorption des stocks historiques de pneumatiques usagés : Recyvalor (Site internet de France Recyclage Pneumatique ; Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009 ; ADEME, 2010)

- **Pneumatiques usagés entiers :** Ces matériaux sont principalement utilisés par les Travaux Publics et le Génie Civil (environ 77 000 T/an en 2009), et plus anecdotiquement par les agriculteurs, en couverture des bâches pour l'ensilage (environ 1200 T/an en 2009), (ADEME, 2010). Une tonne équivaut à 39 pneus VL ou à 18,5 pneus PL (site internet ALIAPUR ; Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009).

- **Pneumatiques usagés découpés ou fragmentés :** Produits par des entreprises de recyclage de pneus, principalement ALIAPUR et France Recyclage Pneumatiques, plus quelques petites entreprises à rayonnement régional, ces matériaux peuvent être utilisés (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009) :

- comme combustibles,
- pour la couverture de terrains de sport (stade de football, de tennis, aire de jeu pour enfants…). Dans certains cas, le sol est ensuite recouvert d'un gazon (terrain de football),
- dans les Travaux Publics.

- **Pneumatiques usagés découpés ou fragmentés :** pas d'information collectée.

- **Pneumatiques usagés transformés** : Le Draingom est utilisé pour des installations de drainage, la réalisation de bassins de rétention et dans les travaux publics. Il serait également utilisé par des paysagistes. Aucun chiffre permettant d'estimer la production annuelle n'a pu être communiqué (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009). 7 usines produisent ce matériau en France (site internet DRAINGOM).
  Ce matériau est utilisé pour des installations de drainage, la réalisation de bassins de rétention, les travaux publics…. Il serait également utilisé par des paysagistes (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009).
  L'ordre de grandeur de prix du Draingom serait de 7 €/m3 foisonné, sur la base d'une infirmation disponible sur un chantier ayant en lieu en 2004 (Site internet de la fédération nationale des travaux publics).

Provenance urbaine du déchet

Ce déchet n'a pas une provenance directement urbaine. Néanmoins, sa production est liée à la densité de population. L'existence de gisements est donc indirectement corrélée à l'urbanisation.

Cadre / Statut réglementaire

Les pneumatiques usagés relèvent directement de directives européennes de portées générales. Il n'existe pas de directive spécifique à l'élimination des pneumatiques usagés (ADEME, 2010). Il s'agit de déchets non dangereux (Site internet OFRIR).
Le cadre réglementaire français actuel est constitué par un décret et deux arrêtés qui confient aux producteurs de pneus (au sens du décret) la responsabilité technique et financière de la collecte et de l'élimination des pneus usagés.
L'arrêté du 7 mars 2008, modifiant l'arrêté du 23 juillet 2004, impose aux producteurs et opérateurs de collecte de déclarer les flux de pneus mis sur le marché et éliminés.

Caractéristiques générales des matériaux

Composition

Pneus en général :
La matière de base du pneumatique est composée principalement d'élastomère naturel, caoutchouc) ou synthétique (copolymère de styrène-butadiène ou autres issus de la pétrochimie) à laquelle on ajoute des charges (noir de carbone), des plastifiants, des antioxydants et des agents de vulcanisation tels que l'oxyde de zinc ou le soufre (site internet OFRIR).
Les tableaux suivants fournissent les compositions moyennes de pneus VL et PL en Europe.

Matériaux	Pneu VL	Pneu PL
Elastomère	47 %	43 %
Noir de carbone	21,5 %	21 %
Acier	16,5 %	27 %
Textile	5,5 %	0%
Oxyde de zinc	1 %	2 %
Soufre	1 %	1 %
Autres	7,5 %	6 %

Composition moyenne d'un pneu VL (véhicules légers) et d'un pneu PL (poids lourds) en Europe (site Internet OFRIR)

Matériau/élément	Pourcentage massique
Caoutchoucs	48%
Noir de carbone	22%
Acier	15%
Textile	5%

Oxyde de zinc	1%
Soufre	1%
Additifs	8%

Composition moyenne d'un pneu VL en Europe (Site internet ADEME ; ETRA)

Pneumatiques usagés découpés ou fragmentés :
Les granulats contiennent au moins 50% de caoutchouc (site internet ALIAPUR). Les broyats, de dimension supérieure à 20 mm, comportent en général des fibres textiles et métalliques). Les granulats et poudrettes, de dimension inférieure à 20 mm, en sont débarrassés (Fiche technique « Granulométrie » d'ALIAPUR). Le taux de fibres textiles dans les granulats est compris entre 0 et 0,3 % (Fiche technique « Taux résiduel de fibres textiles dans les granulats » ALIAPUR)

Humidité/matière sèche, Fraction organique / Fraction minérale / Teneur en matière organique, Granulométrie/texture, Densité, Porosité, Couleur

Humidité :

- Humidité, < 1 % en poids (site internet OFRIR)

Densité :

- **Pneumatiques usagés entiers :**
  - Densité pneus entiers = 0,15 (Site internet ALIAPUR ; site internet OFRIR)

- **Pneumatiques usagés découpés ou fragmentés :**
  - Densité pneus broyés = 0,5 (Site internet ALIAPUR ; site internet OFRIR)
  - 1 Tonne équivaut à 2 m3 broyés (Site internet ALIAPUR)
  - Granulats calibrés15/25 mm : la masse volumique sèche du produit compacté est de l'ordre de 0,60 t/m 3 (NIKOPNEU dans site internet OFRIR)

- **Pneumatiques usagés transformés** : (Fiche produit DRAINGOM)

Paramètres	**Valeurs**
Masse d'un m3 (foisonné)	500 kg
Masse d'un m3 (compacté)	550 kg

Granulométrie :

- **Pneumatiques usagés découpés ou fragmentés :** la taille des granulats de pneus se situe généralement entre 0,8 et 20 mm dans les différentes productions industrielles observées. Les principaux producteurs produisent a minima 3 grands types de granulats : 0,5-2,5 mm pour être utilisés par exemple en sous-couche de gazon synthétique, de 1 à 4 mm notamment pour constituer les sous-couches amortissantes des aires de jeux ou des sols industriels, de 2 à 8 mm pour entre par exemple dans la composition des sols équestres ou des pistes d'athlétisme. Certains industriels produisent également de la « poudrette » comprise entre 0 et 1 mm (peut servie à produire des pièces moulées) (Fiche technique Granulométrie d'ALIAPUR).

  Dimensions principales commercialisées par ALIAPUR sont : de 0,5 à 2 mm / de 1 à 3 mm / de 2 à 6 mm et jusqu'à 10 mm (Site internet ALIAPUR).

- **Pneumatiques usagés transformés** : Le calibre du Draingom (plaquettes de pneus cisaillées) est de 50 à 150 mm (Fiche produit DRAINGOM).

Porosité :

- **Pneumatiques usagés transformés :** La fiche technique du Draingom fournit l'indice des vides pour du matériau foisonné et compacté. La porosité [P = Vv/(Vs+Vv)] peut être déduite de l'indice des vides [e = Vv / Vs] par la relation suivante : P = e /(1+e).

Cependant, dans le cas présent, il semble que, compte tenu du texte accompagnant les données chiffrées (« A l'état foisonné, 1,5 m3 de DRAINGOM stocke 1 m3 d'eau ; à l'état compacté, 1,74 m3 stocke 1 m3 d'eau »), la dénomination « indice des vides » soit un abus de langage et correspondent directement à la porosité. Ainsi aucune conversion ne serait nécessaire.

Paramètres	Valeurs
Indice des vides d'un m3 (foisonné)	0,646
Indice des vides d'un m3 (compacté)	0,566

Le produit est très homogène, il répond à une norme.

Caractéristiques de dangerosité des matériaux (présence de substances, impacts)

Teneurs en substances chimiques

Les données de composition chimique des pneus suivantes sont issues du Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest (Carrillo et al., 2009) et du site internet OFRIR.

Eléments	Pneu VL	Pneu PL	Référence
Carbone (C)	71 %	62 %	ALIAPUR
Hydrogène (H)	7 %	6 %	
Oxygène (O)	4 %	3 %	
Azote (N)	0.5 %	0.5 %	
Soufre (S)	1 %	1 %	
Fer (Fe)	15,5 %	25,5 %	
Zinc (Zn)	1 %	2 %	
Halogènes (Chlore, Brome)	< 0,1 %	< 0,1 %	(Smolders et Degryse, 2002) et (Michelin, 1999)
Cuivre (Cu)	< 0,1 %	< 0,1 %	
Cobalt (Co)	< 0,05 %	< 0,03 %	
Plomb (Pb)	< 50 ppm	< 50 ppm	
Cadmium (Cd)	< 3 ppm	< 3 ppm	
Chrome (Cr)	< 100 ppm	< 180 ppm	
Nickel (Ni)	< 200 ppm	< 300 ppm	
Mercure (Hg)	Non détectable	Non détectable	
Sélénium (Se)	Non détectable	Non détectable	
Te+Sb+Se+V+Cr+Ni+Hg+As+Pb+Co+Sn	< 1000 ppm	< 1000 ppm	
PCP	Non détectable**	Non détectable**	
PCB-PCT *	Non étectable**	Non détectable**	
Zinc (Zn)	> 0,8	> 1,6	

*PCB Polychlorobiphényle – PCT Polychloroterphényle, ** < 0,5 ppm

Composition moyenne élémentaire d'un pneu en % massique ou ppm des éléments présents dans le pneu selon différentes sources. (Site internet ofrir ; Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009*)*

Teneurs en % massique	
Eléments majoritaires (>1%)	
Carbone (C) 78 à 82 %	Hydrogène (H) 7 à 7,5%
Oxygène (O) 2.8 à 3,2 %	Zinc (Zn) 1,6 à 3,1 %
Soufre (S) 1,1 à 2,1 %	Silicium (Si) 1 à 2,3 %
Eléments mineurs (<1%)	
Azote (N) 0,3 à 0,5 %	Calcium (Ca) 0,09 à 0,53 %
Fer (Fe) 0,02 à 0,20 %	
Eléments en traces (<0,06 %)	
Aluminium (Al) 0,03 à 0,06 %	Antimoine (Sb) 0,0006 à 0,0009 %
Brome (B) 0,02 à 0,04 %	Cadmium (Cd) 0,0002 %
Chlore (Cl) 0,02 à 0,06 %	Cobalt (Co) 0,009 à 0,06 %
Cuivre (Cu) 0,002 à 0,02 %	Etain (Sn) 0,0005 %
Magnésium (Mg) 0,03 à 0,05 %	Phosphore (P) 0,01 à 0,03 %
Plomb (Pb) 0,002 à 0,004 %	Potassium (K) 0,03 à 0,06 %
Sodium (Na) 0,03 à 0,06 %	Titane (Ti) 0,004 à 0,01 %
Eléments en traces (<0,001 %) dont certaines valeurs sont en limite de quantification	
Sélénium (Se) LQ à 0,0009	Arsenic (As), Baryum (Ba), Chrome (Cr), Manganèse (Mn), Béryllium (Be), Molybdène (Mo), Nickel (Ni),Vanadium (V) LQ à 0,0006 %
Mercure (Hg) LQ à 0,0001 %	
Eléments en traces (<0,002 %) dont les valeurs sont en limite de quantification	
Fluor (F) 0,002 (LQ) %	Thallium (Tl) 0,0001 % (LQ)

Ordre de grandeur de la composition élémentaire de granulats de pneus usagés (Fiche technique « Composition élémentaire » ALIAPUR).

Les matériaux à base de pneus usagés sont très homogène (site Internet d'ALIAPUR : www.aliapur.fr; site Internet ofrir : http://ofrir.lcpc.fr).
Le pourcentage massique en ZnO est de :

- 1,2 % dans les pneus VL (min=0,4% – max=2,9%) et de 2,1% (min=1,2% – max=4,3%) dans les pneus PL (BLIC Liaison office of the rubber Industry of the EU, 2001, dans Smolters et Degryse, 2002) ;
- 1 % dans les pneus VL et PL (sites internet OFRIR et ADEME).

Lixiviations

- **Pneumatiques entiers :**

Plusieurs études s'intéressent à l'impact des structures utilisant des PUNR (mur de soutènement, bassin de rétention, réaménagement de carrière) sur les eaux souterraines.
Des synthèses bibliographiques effectuées par EEDEMS et ANTEA (Moretto, 2008) montrent que « les PUNR entiers constituent des matériaux faiblement lixiviables. Les teneurs trouvées dans les lixiviats sont en général très proches des seuils de quantification analytique et les retours d'expérience concernant les essais de lixiviation font état de l'absence de risques aux concentrations rencontrées ».

- Mur de soutènement : murs anti-avalanche ou antichute de pierre, mur PNEUTEX (CETE de Lyon) et ARMA PNEUSOL® (LCPC – Forézienne d'Entreprise).

  Le Laboratoire central des ponts et chaussées, a expérimenté cette technique mais aucune données sur l'impact environnemental n'est disponible. Le seul facteur susceptible de dégrader la structure en caoutchouc serait l'acidité du sol. Cependant, aux gammes de pH usuellement rencontrées dans les sols, la structure n'est pas dégradée. Le site internet OFRIR conclut donc à la bonne tenue de la structure dans le temps (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009).
- Bassin de rétention souterrain :

  Dans le cadre d'une étude réalisée par EEDEMS et financée par ALIAPUR et l'ADEME, un bassin de rétention expérimental a été créé avec des pneus de poids lourds entiers et a été suivi pendant 12 mois (Plaquette ALIAPUR, 2008). Des analyses physico-chimiques ont été réalisées en amont et en aval du bassin, sur 3 cycles consécutifs de 4 mois chacun, comprenant un remplissage et une vidange, et simulant un contact entre l'eau et les pneus usagés prolongé. 43 paramètres ont été analysés : pH ; conductivité ; teneur en ammonium ; nitrates ; cyanures totaux ; métaux : As, Ba, Cd, Co, Cr, Cr-VI, Cu, Hg, Mo ; Ni, Pb, Sb, Se, Zn ; sulfates ; chlorures ; fluorures ; 16 HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) ; hydrocarbures totaux ; indice phénol ; carbone total ; carbone inorganique total et carbone organique total.

  Le Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest (Carrillo et al., 2009) indique les concentrations suivantes dans les eaux en sortie de bassin (2ème colonne).

Eléments	Valeur moyenne BR*	Valeur moyenne RC**	Références
Zinc	0,038 mg / l	160 µg / l	eedms

Sulfates	8,22 mg / l	527 mg / l	eedms
HAP***	0, 874 µg / l	0,05 µg / l	eedms

* BR : Bassin de rétention.
** RC : réhabilitation carrière (voir paragraphe suivant). Attention : il est établi que les concentrations dans la nappe en aval de la carrière est déterminée par les matériaux inertes qui y sont stockés.
*** Somme des concentrations de 6 hydrocarbures aromatiques polycycliques visés par le décret "eau potabilisable" : Benzo(k)fluoranthène, Fluoranthène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(a)pyrène, Indeno(1,2,3-cd) pyrène, Benzo(g,h,i) pérylène.

Les résultats ne sont pas intégralement disponibles, il nous est donc impossible de comparer les concentrations en amont et an aval du bassin. Ces résultats montreraient que les différentes substances recherchées (métaux, hydrocarbures, …) sont toujours à des niveaux inférieurs aux valeurs de gestion réglementaires existantes : arrêté sur les rejets des ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) du 02 février 1998 et décret n° 2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine (seuils sur les eaux potabilisables).

En complément des essais d'écotoxicité [daphnies (NF EN ISO 6341), vers de terre (NF EN ISO 17512-1), algues d'eau douce (NF T90-375), semences d'orge (NF X31-201)] ont été réalisés sur les eaux prélevées dans le bassin lors du premier cycle. Les résultats chiffrés ne sont pas fournis mais ces essais ne montreraient aucune toxicité de l'eau issue du bassin.

- Réaménagement de carrière : L'étude Moretto (2008) évalue par des expérimentations en laboratoire et sur site les impacts de l'utilisation de pneus usagés comme remblais en réaménagement de carrière (technique de type Pneusol®), soumis à l'influence des eaux météoriques et partiellement immergés dans la nappe. Cette étude met en évidence l'absence d'enrichissement notable en métaux, métalloïdes et composés organiques des eaux de la nappe (réelles ou simulées) à la suite de l'apport des PUNR par rapport au témoin au bout de 11 (échelle du site) et 12 mois (échelle du laboratoire) d'expérimentation. De ce fait, les résultats analytiques obtenus (reflet de la qualité des matériaux inertes stockés) ne sont pas présentés. De plus, les essais écotoxicologiques réalisés (toxicité aigüe : *Daphnia magna*, toxicité chronique : *Pseudokirchneriella* et en 72h et *Ceriodaphnia dubia* n'ont montré aucune écotoxicité significative.

- **Pneumatiques usagés découpés ou fragmentés :**

Des sols (limons sableux acides) amendés par des fragments de pneus ont été placés dans des lysimètres (les conditions expérimentales –débits, durées, etc.- ne sont pas décrites) (Groenevelt et Grumthal, 1998). Les éluats collectés ont fait l'objet d'analyses pour les COV, les BNA (base, neutral and acid extractable substances – liste de paramètres selon US-EPA) et les éléments suivants Al, Au, B, Ba, Be, Ca, Cd, Cr, Co, Cu Fe, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sr, Ti, Va, Zn et Zr. Il n'a pas été mis en évidence de concentration élevée en COV ou BNA dans les éluats. Des concentrations sensiblement élevées en zinc (0,18 mg/kg), sodium (8,77 mg/kg) et bore (0,14 mg/kg) sont en revanche observée dans les éluats des sols contenant 30 % de fragments de pneus par rapport au sol témoin (sans fragments de pneus) : zinc = 0,03 mg/kg, sodium = 4,10 mg/kg et bore = 0,05 mg/kg. Ainsi, les concentrations en Zn dans l'éluat issu du mélange sol + 30 % de pneu fragmenté sont 6 fois supérieures aux concentrations dans le lixiviat du sol témoin. Il convient cependant de noter que la teneur en Zn total dans le sol a été multipliée par un facteur très largement supérieur à 6. Ainsi, le Zn apporté par le pneu est proportionnellement moins lixiviable que celui naturellement présent dans le sol (Smolters et Degryse, 2002). Les sols même amendés par 30 % de fragments de pneus et de la chaux présentent des concentrations dans les éluats analogues à celles du sol témoin. A présence de chaux annule donc le relargage induits par les fragments de pneus.
Une autre étude sur le devenir Zn lors de l'incorporation de débris de pneus dans deux sols (sol sableux et sol limoneux) a été menée (Smolters et Degryse, 2002). Les sols, témoins, mélangés avec des fragments de pneus et mélangés avec du sulfate de Zn ($ZnSO_4$), ont été mis dans des colonnes disposée à l'extérieur pendant 11 mois et les éluats ont été analysés à intervalles réguliers. Les éluats des colonnes contenant des fragments de pneus ne présentent pas des concentrations en Zn significtivement supérieures aux témoins, sauf pour l'un des sols amendé pas des débits de pneus de voiture pour lequel la concentration sur éluat des multipliée par 3. Cette augmentation représente seulement 3 % de l'augmentation liée au traitement par ZnSO4, pour une même teneur totale en Zn dans le sol. Cette étude montre que la majorité du zinc contenu dans les débris de pneus avant l'incorporation est relargué la première année suivant l'incorporation des débris dans le sol. Les sols amendés par des débris de pneus révèlent une augmentation systématique du pH par rapport aux sols témoins, de >1,5 et 0,7 unité respectivement pour les sols sableux et limoneux. Cette augmentation du pH a pour conséquence de limiter la mobilité du Zn et d'augmenter le potentiel de nitrification du sol (alors qu'il diminue avec l'ajout de Zn SO4).

Ainsi, l'étude de Smolters et Degryse (2002), comme celle de Groenevelt et Grumthal (1998) montre l'importance du pH du sol dans la maitrise des relargages de Zn par les sols amendés par des débrits de pneus.

- **Pneumatiques usagés transformés :** (Interview de M. Montreux, inventeur du produit DRAINGOM, dans Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009, et fiche produit DRAINGOM) :

  D'après l'inventeur du produit, il n'y aurait pas de problème de pollution par les métaux lourds (même pour le zinc). Des analyses montreraient que l'on se situe en dessous des seuils de toxicité. Cependant, la société Draingom ne souhaite pas communiquer ces analyses.
  Sur le terrain, on observerait un lessivage très important d'oxydes de fer (car les pneus sont uniquement cisaillés, la lame de métal reste) lors des premières pluies suivant l'installation.
  Le laboratoire national des eaux de la ville de Marseille atteste que le DRAINGOM ne produit pas de lixiviats ni de fines et que les eaux provenant de ces bassins peuvent être rejetées dans le milieu naturel et réseau les réseaux EP.

Transfert sol-plante

- **Pneumatiques usagés découpés ou fragmentés :**

Dans des conditions de pH acide, le Zn lié à la gomme de pneu peut devenir disponible pour les plantes.
Groenevelt et Grumthal (1998) ont réalisé des essais d'amendement de sols limono-sableux fins et alcalins en incorporant des fragments de pneus usagés de calibre 8 mm dans des sols dans des proportions variant de 0 à 40 %. Les auteurs ont noté une augmentation de la teneur en zinc dans le gazon cultivé sur ces sols : 0% de pneus fragmentés : teneur en zinc dans le gazon de 40 mg/kg ; 40 % de pneus fragmentés : teneur en zinc dans le gazon de 85 mg/kg environ.

Données d'écotoxicité

Toxicité pour les écosystèmes terrestres : il existe très peu de données. Wik et Dave (2009) en font une synthèse.

- Effet sur la croissance du végétal :

  Une diminution des rendements de croissance des végétaux est constatée pour plusieurs espèces végétales lorsqu'on incorpore des fragments de pneus usagés au sol : le haricot *Phaseolus* (Schulz, 1987), *Chrysanthemum* (Bowman et al., 1994), *Pelargonium* (Newman et al., 1997), *Petunia* et *Impatiens*. Ces effets sont attribués à la toxicité du Zn.

  L'espèce la plus sensible serait *Petunia* pour laquelle seulement 5 % de débris de pneus dans son milieu de culture induisait une diminution de la croissance.

  La taille des fragments de pneu utilisés aurait une influence sur la survenue et l'intensité de l'effet toxique associé au zinc (croissance et teneur en Zn dans les tissus). Ainsi, les essais sur *Chrysanthemum* ont montré que les effets sur le végétal des particules fines (< 2 mm) étaient plus importants que ceux des particules grossières (> 2 mm) (Bowman et al., 1994).

- Effet sur la nitrification :

  Alors qu'on aurait pu attendre, lors d'essais d'incorporation de pneus dans les sols, une diminution du potentiel de nitrification du sol (du fait de la toxicité du Zn), Smolters et Degryse (2002) ont montré que la présence de fragments de pneus conduisait à une augmentation du pH, qui stimulait le potentiel de nitrification du sol.

Toxicité pour les écosystèmes aquatiques :

La toxicité aigüe des lixiviats de pneus a été étudiée par plusieurs études en laboratoire, sur la base d'organismes appartenant à différents niveaux trophiques : poisson, copépodes, bactéries, algues. Wick et Dave (2009) en proposent une synthèse sous la forme des deux tableaux suivants :

Toxicity of tire leachates as reported in various studies using different leaching procedures and test organisms.

Leaching procedure	Test organism	Toxicity	Reference
Whole tires in sea water for 21–101 d	*Lagodon rhomboides* *Centropristis striata*	Nonlethal Nonlethal 21 d; Lethal 29 d	Stone et al. (1975)
Whole tire or tire pieces in lake water for 30–60 d	*Salmo gairdneri* *Daphnia magna*	Lethal 96 h Nonlethal 48 h	Kellough (1991)
Tire pieces in tap water (200 g l^{-1}) for 1–65 d	*Oncorhynchus mykiss* *D. magna* *Vibrio fischeri*	96-h LC_{50} 10–33% 72-h LC_{50} 12.5% Light output 70% of control	Goudey and Barton (1992)
Whole tires in dilution water (200 g l^{-1}) for 5–40 d	*D. magna* *Ceriodaphnia dubia* *V. fischeri* *O. mykiss* *Spirillum volutans* *Escherichia coli* (TOXI-chromo test) *Panagrellus redivivus*	Mortality 0–100% Mortality 67–100% Light output 8–44% of control Mortality 0–80% No inhibition of motility Colour inhibition 0–14% Nonlethal	Day et al. (1993)
Information on leaching procedure not available	*Eurytemora affinis*	Mortality 100%	Hall et al. (1993)
Tire pieces in lake water (4.5–7.5 g l^{-1}) for 31 d	*C. dubia* *Pimephales promelas*	24-h LC_{50} 20% Nonlethal 24-h	Nelson et al. (1994)
Whole tire in water for 10–14 d	*O. mykiss* *P. promelas* *D. magna* *C. dubia*	96-h LC_{50} 34% Nonlethal 96-h Nonlethal 48-h Nonlethal 48-h	Abernethy (1994)
Tread pieces in lake water (2.3 g l^{-1}) for 14 d	*Salmo trutta*	LT^{50} 1.6–57 h	Ahlbom et al. (1996)
Tire crumb in dilution water (25 g l^{-1}) for 24 h	*D. magna* *O. mykiss*	48-h EC_{50} 15–>100% 96-h LC_{50} 27–77%	Abernethy et al. (1996)
Tire pieces TCLP extracted in synthetic sea water (50 g l^{-1})	*Cyprinodon variegates* *Palaemonetes pugio*	NOEC mortality 6–13% NOEC growth 6% NOEC mortality 6% NOEC growth 6%	Hartwell et al. (1998)
Tire pieces TCLP extracted in synthetic sea water (50 g l^{-1})	*V. fischeri*	Light output 25–60% of control	Hartwell et al. (2000)

Toxicity of leachates of tire wear particles (tread particles) to aquatic organisms.

Test species	Effect concentration (EC/LC_{50} in mg l^{-1})	Comment	Reference
Green algae *Pseudokirchneriella subcapitata*	470; 1640	Diluted leachate from two leachate concentrations; 72-h EC_{50}	Gualtieri et al. (2005b)
	50–2800	Sequential leachates from three tires; 72-h EC_{50}	Wik et al. (in press)
Water flea *Daphnia magna*	26750; 53300	Diluted leachate from two leachate concentrations; 48-h EC_{50}	Gualtieri et al. (2005b)
	300–32000	Leachates from 12 tires; 24-h EC_{50}	Wik and Dave (2005)
	100–2400	Leachates from 12 tires; 48-h EC_{50}	
	60–400	Leachates from 12 tires; 48 h + 2 h UV light EC_{50}	
	1200–>10000	Diluted leachates from 25 tires; 24-h EC_{50}s	Wik and Dave (2006)
	300–>10000	Diluted leachates from 25 tires; 48-h EC_{50}s	
	370–7500	Sequential leachates from three tires; 48-h EC_{50}	Wik et al. (in press)
Water flea *Ceriodaphnia dubia*	550–5000	48-h EC_{50}	
	50–3600	9d survival EC_{50}	
	10–1800	9d young/female EC_{50}	
Zebrafish eggs *Danio rerio*	550–>10000	48-h LC_{50}	
Frog embryo *Xenopus laevis*	50000–100000	27–80% mortality and 80–98% malformed larvae after 120-h exposure	Gualtieri et al. (2005b)
Overall range	10–100000	1–9 d exposure to standard organisms	All references above
PNEC	3.9	Based on long-term NOECs for *P. subcapitata* and *C. dubia*, divided with an assessment factor of 50	This study

Quelques études s'interressent aux effets sub-léthaux sur les organismes aquatiques des lixiviats de particules de pneus. Ces études montrent globalement que les composés présents dans ces lixiviats ont des effets tératogènes, mutagènes et œstrogèniques (Wick et Dave, 2009).

Données de toxicité

L'ADEME considère que le stockage des pneumatiques n'est globalement pas dangereux mais si un incendie survient, des fumées toxiques et un liquide huileux seront émis, constituants un danger pour la santé humaine et pour l'environnement. (ADEME, 2009. A chaque déchet des solutions, www.ademe.fr).

Des études épidémiologiques récentes s'intéressent au lien entre la présence de particules de pneus dans l'air et la survenue d'effets néfastes dans la population. Wik et Dave (2009) en font une synthèse. Il est parfois suggéré que ces particules contribuent à l'augmentation des allergies au latex et des symptômes d'asthme liés à la pollution atmosphérique urbaine. D'autres études en revanche estiment que la concentration des particules de latex dans l'air attribuable à l'usure des pneus n'est pas suffisamment importante pour être responsable de ces problèmes de santé. Une étude chez le rat exposé par inhalation à de l'air prélevé dans différents sites présentant un trafic important révélerait une toxicité qui serait associée à la présence de particules de Zn issu de l'usure des pneus. Enfin, les particules issues de l'usure des pneus engendreraient des effets néfastes sur les cellules épithéliales des poumons (augmentation de la mort cellulaire et dégâts sur l'ADN, effets sur les cellules A549).

Caractéristiques strictement agronomiques des matériaux

- **Pneumatiques usagés découpés ou fragmentés :**

L'utilisation de fragments de pneumatiques usagés de 8 mm de diamètre comme amendement des sols notamment sportifs, dans des proportions comprises entre 0 et 40 %, a montré des effets positifs sur la fertilité physique des sols, à savoir (étude bibliographique dans Groenevelt et Grumthal, 1998) :

- une diminution de la compaction, une augmentation de la porosité ;
- une diminution de la dureté et une augmentation de l'élasticité ;
- une diminution de la teneur en eau.

Smolters et Degryse (2002) ont montré que des sols amandés par des débris de pneus présentent une augmentation systématique du pH par rapport aux sols témoins, de >1,5 et 0,7 unité respectivement pour les sols sableux et limoneux.
Couleur : noir/ gris foncé.

- **Pneumatiques usagés fragmentés puis compostés** Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009 :

Une étude (Higgins et al., 1986) a été menée en 1986 aux USA sur des composts de pneumatiques fragmentés mélangés avec des boues primaires (boues brutes, non traitées). Les objectifs de cette étude étaient de déterminer la proportion boues/pneus optimale, tester l'apport d'une autre source de Carbone (comme de la sciure ou du compost déjà mûr) pour optimiser le processus de compostage et évaluer l'impact des pneus sur les teneurs en métaux lourds du compost final.
3 tailles de fragments de pneumatiques sont été utilisées : petit (1.27 – 2.54 cm), moyen (2.54 – 5.08 cm), et grand (>2.08 cm). A la suite des processus de broyage, les fragments ont subit un traitement magnétique pour éliminer le maximum d'acier.
Les résultats obtenus sont :

- les fragments de petite taille sont les plus efficaces, avec une proportion de 2/1 (2 unités de fragments de pneumatiques/1 unité de boue).
- l'apport de matières organiques supplémentaires permet de diminuer la quantité d'ETM dans le produit final,
- les teneurs en Zinc et Fer sont élevées dans le compost final, et sont uniquement dues à l'apport des pneus,
- les traces de Fer disparaissent relativement vite, par oxydation, mais le Zinc reste en quantité importante dans le sol (pas de données chiffrées).

Les auteurs concluent que les teneurs élevées en Zinc et Fer dans le produit final constituent une limite à l'utilisation de pneumatiques en compost.
En 1983, une autre étude a été menée sur l'élaboration de compost avec des copeaux de pneus (Harding et al., 1983). A la place d'un compost réalisé au départ à partir de boues de STEP et de copeaux de bois (50 à 75% de boues, 25 à 50% de copeaux de bois), l'idée de cette étude est de remplacer partiellement, voire totalement, les copeaux de bois par des copeaux de pneus usagés.
Différents taux de copeaux de pneus ont été testés, ainsi que différents calibres de copeaux.
Cette étude a montré que :

- Le calibre optimal des copeaux de pneus se situe entre 2,5 et 6,5 cm. Pour des copeaux de calibres supérieurs, le compostage est de moins bonne qualité. Les plus gros copeaux forment une enveloppe à l'extérieur de l'andain qui empêche une bonne pénétration de l'air dans ce dernier. Ceci se traduit par un compost humide dont la boue n'est pas complètement humifiée. La tendance est inverse par rapport à l'étude précédente.
- Quant aux proportions boues / copeaux, il apparaît, à la suite de cette étude, qu'au delà de 50% de copeaux de pneus le processus de compostage n'est plus optimum. On constate également une forte humidité du mélange et des boues non compostées totalement.

D'autres expérimentions, présentées dans une synthèse (Morel, 2000), rapportent que les proportions idéales pour les mélanges de pneus sont :

- 16,6 % de copeaux de pneus, 16,6 % de tourbe, 50 % copeaux de bois, 16,6 % sable, ou
- 33 % copeaux de pneus, 50 % copeaux de bois, 16,6 % sable.

Il apparaît que l'incorporation de copeaux de pneus dans les substrats horticoles diminue la capacité de rétention en eau. Il semblerait que la survie et la qualité des plantes soient toujours plus faibles en présence de copeaux de pneus. Toutefois, le poids de matière sèche de la plante est statistiquement identique au témoin (tourbe / copeaux de bois / sable) lorsqu'on incorpore 16.6 % de copeaux de pneus (Morel, 2000).

Enfin, on peut souligner que les fragments de pneus ont des propriétés d'adsorption fortes, démontrées pour certains produits organiques et le mercure, qui conduit à proposer leur utilisation dans des Barrières Perméables Réactives pour la dépollution des eaux souterraines (Smith et al., 2001 ; Gunasekara et al., 2000).

- **Pneumatiques usagés transformés :** (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009) :

Il ne semble pas y avoir de phytotoxicité car le produit est utilisé par des paysagistes. Aucun résultat n'est disponible.
Pour l'utilisation en couverture de bassin engazonné, les commerciaux conseillent de recouvrir l'ouvrage de 40 cm minimum de terre végétale.
Quant aux plantations, il est recommandé d'utiliser des plantes à système radiculaire horizontal. Les végétaux dont le système racinaire est un pivot sont déconseillés.

Caractéristiques strictement mécaniques des matériaux

- **Pneus entiers :**

Les caractéristiques mécaniques de la bande de roulement et des flancs des pneumatiques ont été déterminées dans le cadre de la réalisation des ouvrages PNEUSOL.

Paramètre	Valeur min	Valeur max	Références
Résistance à la traction des bandes de roulement	26 kN	56 kN	Site internet OFRIR
Résistance à la traction des flancs	17 kN	52 kN	

- **Pneumatiques usagés transformés** :

Paramètres	Valeurs	Référence
Poussées horizontales	Absence de retransmission horizontale des efforts verticaux (Coefficient de Poisson quasi-nul)	Fiche technique produit DRAINGOM
Angle de frottement	entre 19° et 21°	
Cohésion du matériau	entre 17 et 12 KPa	

Bibliographie :

ADEME (2010) Observatoire de la Filière Pneumatiques Usagés, Rapport annuel de la mise en œuvre des dispositions réglementaires relatives aux pneumatiques usagés - Situation en 2009, Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par la société Ernst & Young
Site internet ADEME « A chaque déchet des solutions » : http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?m=3&cid=96&catid=14849
Site internet Aliapur : http://www.aliapur.fr/modules/movie/scenes/home/index.php
Plaquette ALIAPUR, 2008. Pneumatiques comme éléments de structure des bassins de rétention : évaluation technique et environnementale d'un bassin expérimental, édité par ALIAPUR, partenariat ALIAPUR-ADEME-eedems-SLEG.
Fiches techniques « Granulométrie »,« Composition élémentaire », « Taux résiduel de fibres textiles dans les granulats » d'ALIAPUR : http://www.aliapur.fr/modules/movie/scenes/home/index.php
Bowman D. C., Evans R. Y. et Dodge L. L. (1994) Growth of chrysanthemum with ground automobile tires used as a container amendment, Hortscience, vol. 29, pp.774–776.
Carrillo L., Emile F., Castaldi G., Perrin B. et Wagner C. (2009). Matériaux minéraux potentiellement utilisables en espaces verts : matériaux alternatifs pour les mélanges Terre-Pierre établis à partir de la classification européenne des déchets. Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest.
Site internet DRAINGOM : www.draingom.fr
Draingom, Fiche technique produit.
Site internet de la fédération nationale des travaux publics : 10 expériences de valorisation des excédents et des déchets sur un chantier de TP http://www.fntp.fr/tmgen/bibliotheques/fichiers/Telechargement/TL-2007-04-17-17-51-50.pdf
Site internet de France Recyclage Pneumatique : http://www.gie-frp.com/

Groenevelt P. H. et Grumthal P. E. (1998) Utilisation of crumb rubber as a soil amendment for sports turf, Soil & Tillage Research, vol. 47, pp. 169-172.
Gunasekara A. S., Donovan J. A. et Xing B. (2000) Ground discarded tires remove naphthalene, toluene, and mercury from water, Chemosphere, vol.41, pp.1155-1160.
Higgins A. J., Suhr J. L., Siddiqur Rahman M., Singley M. E. et Rajput V. S. (1986) Shredded rubber tires as a bulking agent in sewage sludge composting, Waste amanagement and research, p 367 – 386.
Harding G.T., Romano L.S. et Epstein E. (1983) Elaboration d'un compost à base fragments de pneus.
Morel P. (2000) Usage de pneus dans les composts horticoles.
Moretto R. (2008) Evaluation environnementale de la valorisation géotechnique de pneus usagés non réutilisables (PNUR) entiers dans le cadre de réaménagement de carrières : synthèse des travaux réalisés par le bureau d'Etude ANTEA (2006) et le groupement d'intérêt scientifique EEDEMS (2006-2007).
Newman S. E., Panter K. L. et Roll, M. J. (1997) Growth and nutrition of geraniums grown in media developed from waste tire components, Hortscience, vol. 32, pp. 674–676.
Site internet OFRIR (observatoire Français du Recyclage dans les Infrastructures Routières) : http://ofrir.lcpc.fr
Schulz M. (1987) Effects of ground rubber on Phaseolus vulgaris, Z. Pflanzrnahr Bodenk, vol. 15, pp. 3741.
Smith C. C., Anderson W. F. et Freewood R. J.(2001) Evaluation of shredded tyre chips as sorption media for passive treatment walls, Engineering Geology, vol. 60, pp. 253-261.
Smolders E. et Degryse F. (2002) Fate and Effect of Zinc from Tire Debris in Soil Environmental science & Technology, vol. 36-17, pp. 3706-3710.
Wik A. et Dave G. (2009) Occurrence and effects of tire wear particles in the environment – A critical review and an initial risk assessment, Environmental Pollution, vol. 157, pp. 1–11.

Déchets de construction et de démolition : Béton (17-01-01)

17 01 01	béton	Béton, briques, tuiles et céramiques :	Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)

Disponibilité

Importance du gisement (tonnage produit par an)

- Données datant du début des années 90 issues du Guide Ademe « Déchets du bâtiment » volume 1 de 1998 :

en tonnes par an	Base de ciment, mortier et béton	Béton armé	Céramique	Céramique, argile et terre cuite	Argile et terre cuite	Produits inertes	Total des 6 déchets
Alsace	106 500	80 500	34 800	380	15 000	172 900	**543 500**
Aquitaine	118 800	89 800	38 800	420	16 700	192 900	**606 400**
Auvergne	69 400	52 400	22 700	250	9 700	112 700	**354 000**
Bourgogne	67 000	50 600	21 900	240	9 400	108 800	**342 100**
Bretagne	147 900	111 800	48 300	530	20 800	240 200	**755 000**
Centre	90 700	68 500	29 600	320	12 700	147 200	**462 800**
Champagne-Ardenne	53 700	40 600	17 600	190	7 500	87 300	**274 300**
Corse	8 200	6 200	2 700	30	1 200	13 300	**41 900**
Franche-Comté	54 500	41 200	17 800	190	7 700	88 500	**278 200**
Ile-de-France	931 100	703 400	304 100	3 320	130 800	1 511 700	**4 751 200**
Languedoc-Roussillon	123 700	93 500	40 400	440	17 400	200 900	**631 300**
Limousin	22 100	16 700	7 200	80	3 100	35 900	**112 700**
Lorraine	89 900	67 900	29 400	320	12 600	146 000	**458 800**
Midi-Pyrénées	112 000	84 600	36 600	400	15 700	181 800	**571 500**
Nord-Pas-de-Calais	141 300	106 800	46 200	500	19 800	229 400	**721 100**
Basse-Normandie	52 800	39 900	17 200	190	7 400	85 700	**269 300**
Haute-Normandie	53 000	40 000	17 300	190	7 400	86 000	**270 300**
Pays-de-la-Loire	114 500	86 500	37 400	410	16 100	186 000	**584 400**
Picardie	70 400	53 200	23 000	250	9 900	114 200	**359 000**
Poitou-Charentes	54 300	41 000	17 700	190	7 600	88 200	**277 300**
PACA	232 200	175 400	75 800	830	32 600	377 000	**1 184 800**
Rhône-Alpes	342 000	258 400	111 700	1 220	48 000	555 300	**1 745 300**
Total France	**3 056 100**	**2 308 900**	**998 300**	**10 900**	**429 200**	**4 962 000**	**15 594 900**

- Données non datée issues de Trinel B. (2009) : Déchets minéraux du bâtiment (inertes) tels que les bétons, les briques, les tuiles: 20,3 millions de tonnes/an.

Existence de filières de valorisation et importance de ces filières

Elaboration des granulats de béton recyclé

Elaboration des granulats recyclés à partir de béton issus de chantier de démolition du bâtiment par des opérations de (site internet OFRIR) :

- sélection (ou tri) visuelle du lot. Refus des lots jugés trop riches en bois, plâtre, brique, isolant, papier, etc. ;
- réduction primaire au brise-roche pour réduire les plus gros éléments et extraire mécaniquement le ferraillage ;
- concassage primaire avec des concasseurs à mâchoires ou à percussion, afin d'obtenir des matériaux dont la taille n'excède pas 100 à 150 mm ;
- déferraillage par un séparateur électromagnétique ;
- criblage et un tri manuel pour éliminer les impuretés résiduelles ;
- et éventuellement :
  - concassage secondaire sur la fraction supérieure issue du concassage primaire ;
  - plus rarement, un traitement par des dispositifs d'épuration, afin d'éliminer les impuretés légères.

Ces opérations peuvent être réalisées directement sur le site de démolition, ou après acheminement des matériaux vers des plates-formes de regroupement et de tri.

Existence des filières de valorisation des granulats de béton recyclé

« Les graves de béton concassé sont utilisées en sous-couche de chaussée, les sables en tranchée pour le calage des canalisations » (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo L. et al., 2009).

Les différents types de production visent les domaines d'emploi suivants (site internet OFRIR) :

- matériaux de pré-criblage et grave non calibrée en remblais et en couche de forme ;
- grave 0/D en couche de chaussée traitée ou non aux liants hydrauliques ;
- sable 0/D et gravillons d/D en recomposition de grave traitée ou non aux liants hydrauliques.

Ils sont moins chers que les granulats issus d'alluvions et de carrières. L'entreprise Carré SARL commercialise du béton recyclé en granulométrie (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo L. et al., 2009) :

- 0/06 ou 0/80 pour 11,10€/t ;
- 0/31,5 pour 11,30 €/t.

De plus, cette filière permet le double fret (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo L. et al., 2009) : dans un sens, apport de déchets de démolition à la plate-forme, et dans l'autre sens, achat de granulats.

Importance des filières de valorisation des granulats de béton recyclé

Le Syndicat National des Producteurs de Granulats Recyclés (SNPGR) estimait la production de graves/granulats de béton recyclé à 9 Mt pour l'année 2002 (site internet OFRIR), ce chiffre étant en progression par rapport aux données de 1995 (5 Mt) et de 1990 (3 Mt) (site DREAL Franche Comté). Cette production de 9Mt s'est maintenue en 2003 et représentait alors 2% de de la production nationale de granulats (Newsletter n°8 du LERM).

Une estimation réalisée pour la région IDF en 2001, fondée sur les capacités des installations de recyclage, fait apparaître un potentiel de production de graves/granulats de béton recyclé de 3,1 millions de tonnes/an dans cette région (site internet OFRIR).

Les chantiers utilisant les matériaux de démolition recyclés sur des voiries peu circulées sont nombreux et se développent pratiquement partout en France, plus particulièrement dans les régions suivantes : Rhône-Alpes, Auvergne, Alsace, Nord Picardie, Ile de France (site internet OFRIR).

Les zones de production sont les grandes agglomérations qui sont susceptibles d'offrir un potentiel régulier de matériaux de démolition.

Statut réglementaire

Les bétons issus de chantiers de démolition sont des «déchets inertes » vis à vis de la mise en décharge (à l'exclusion du plâtre).

Circulaire MATE/MELT du 15 février 2000 décrit la mise en place d'une planification de la gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics (mise en place de plans départementaux de gestion des déchets de chantiers du bâtiment et des travaux publics).

Caractéristiques générales des matériaux

Composition

Les bétons comportent (CIMBETON, 2005 et 2006) :

- **du ciment :**
  - ciment Portland
    - 95 % clinker (= granules obtenues à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respective moyenne de 80 %/20 %) broyé (mélange de CaO, SiO2, Al2O3 et F2O3, et dans une moindre mesure de MgO, SO3, K2O, Na2O, TiO2) ;
    - gypse (sulfate de calcium) : moins de 5 % ;
  - autres types de ciment sont obtenus en ajoutant d'autres constituants :
    - laitier de haut fourneau (refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau) ;
    - des cendres volantes (particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé) ;

        - des schistes calcinés (schistes houillers brûlés dans les chaudières) ;
        - des pouzzolanes : essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ;
        - du calcaire (teneur en $CaCO_3$ supérieure à 75 %) ;
        - des fumées de silice (particules très fines présentant une très forte teneur en silice amorphe) ;
    - ciment Portland composé : > 65 % de clinker et < 35 % d'autres constituants ;
    - ciment dit de hauts fourneaux : 36 à 95 % de laitier, le reste de clinker ;
    - ciment composé: 20 à 64 % de clinker,18 à 50 % de cendres volantes et 18 à 50 % de laitier ;
    - prise : multiplication et développement de microcristaux de silicates et aluminates de calcium hydratés ainsi que de la chaux hydratée dite portlandite.
- **des granulats. Principaux composants du béton (70 % en poids).**
    - granularité : Les granulats utilisés pour la confection des bétons sont des fillers, des sables, des gravillons, des graves. La plupart des bétons sont composés à partir de deux classes : un sable de type 0/5,6 et un gravillon 5,6/12,5 ; 5,6/16 ou 5,6/20 ;
    - granulat naturel :
        - les granulats de roche meuble (alluvions), dits roulés : le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires ;
        - les granulats de roche massive, dits granulats de carrière (anguleux) :
            - par exemple, selon la géologie locale : grès, grès quartziques, silex, calcaires, granite, rhyolite, diorite, basalte, gneiss, micaschistes, quartzites… ;
            - caractéristiques dépendant de l'origine de la roche et du degré de concassage ;
    - granulat artificiel : principalement du laitier cristallisé concassé et du laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau ;
    - granulats recyclés : principalement des granulats obtenus par recyclage de béton de démolition ;
    - granulats et composants légers :
        - granulats légers usuels : argile expansée, schiste expansé ou laitier expansé ;
        - les composants légers : polystyrène expansé, liège, vermiculite.
- **des adjuvants incorporés en faible quantité :**
    - plastifiants-réducteurs d'eau, super-plastifiants (anciennement fluidifiants) :
        - les plastifiants réducteurs d'eau :
            - à base de lignosulfonates, de sels d'acides organiques, de mélamine sulfonate, de naphtalène sulfonate et dérivés de mélamine ou naphtalène ;
            - dosage : < 0,5 % de la masse du ciment ;
        - les superplastifiants :
            - en général des produits de synthèse organique. Les plus utilisés : dérivés de mélamines ou de naphtalène ;
            - ou bien fabriqués à partir de sous-produits de l'industrie du bois purifiés et traités (lignosulfonates) ;
            - adjuvants dits de « nouvelle génération » : polyacrylates et polycarboxylates ;
            - dosage : 0,5 % à 3 % de la masse du ciment ;
    - modificateurs de prise ou de durcissement (accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise) :
        - accélérateurs de prise et les accélérateurs de durcissement :
            - adjuvants normés généralement des dérivés de la soude, de la potasse ou de l'ammoniaque ;
            - adjuvants non normés : accélérateurs chlorés ;
            - dosage : 0,2 % à 3 % de la masse du ciment ;
        - retardateurs de prise :
            - à base de lignosulfonates, d'hydrates de carbone ou d'oxydes de zinc ou de plomb ;
            - dosage : 0,1 % à 1 % de la masse du ciment ;
    - modificateurs de certaines propriétés particulières : entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse.
        - entraîneurs d'air :
            - corps tensio-actifs : lignosulfonates, abiétates de résines, sels d'éthanolamine ;
            - dosage : 0,01 % à 0,5 % de la masse du ciment ;
        - hydrofuges de masse :
            - généralement à base d'acides gras ou de leurs dérivés (stéarates) ;
            - peuvent également comporter des matières fines (type bentonite) ainsi que des agents fluidifiants ;
            - dosage : 1 % à 3 % de la masse du ciment ;
        - rétenteurs d'eau :

- des agents colloïdaux ou des dérivés de la cellulose ;
- dosage : < 0,5 % de la masse du ciment.

Humidité/matière sèche, Fraction organique / Fraction minérale / Teneur en matière organique, Granulométrie/texture, Densité, Porosité, Couleur

Les caractéristiques de teneur en matière sèche, de granulométrie, de densité, de porosité des granulats de béton recyclé sont dépendantes des opérations de traitements citées au paragraphe 0.

Le tableau fournit un exemple de caractéristiques physiques de granulats de béton recyclé (Boudlal et Melbouci, 2010) :

Caractéristiques déterminées	Moyenne
Teneur en eau naturelle : w (%)	2,40
Masse volumique des grains solides : ρ_s (g/cm^3)	2,62
Masse volumique sèche : ρ_d (g/cm^3)	1,76
Masse volumique humide : ρ_h (g/cm^3)	1,80
Indice des vides : e (%)	49
Porosité : n (%)	33
Degré de saturation : Sr (%)	1,5

D'après les données relatives aux installations de recyclage des bétons, il semble que les fragments de bétons soient généralement concassés de telle sorte que la taille des granulats soit inférieure à 100 à 150 mm (en tout cas pour la réutilisation en technique routière).

Des données sont en revanche disponibles sur le matériau d'origine le béton.
Propriétés des bétons les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics (CIMBETON, 2005 et 2006) :

- teneur en eau :

Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant				
Constituants	***Eau***	***Air***	***Ciment***	***Granulats***
Volume (en %)	14-22	1-6	7-14	60-78
Poids (en %)	5-9		9-18	65-85

- masse volumique de 2500 kg/m^3 environ.
- porosité : Compacités réellement atteintes sur chantier ne dépassent guère 0,850

Caractéristiques de dangerosité des matériaux (présence de substances, impacts)

Données de percolation/lixiviation :

- *Site OFRIR :*
  - *Lixiviation sur un matériau issu du concassage de produits de démolition et caractérisation de l'éluat (LRPC Strasbourg, 1989) :*

Paramètre sur éluat	***Valeur***
pH	*supérieur à 10*
aluminium	*teneur assez forte*
métaux lourds	*teneurs très faibles*

  - *Lixiviation sur différents matériaux issus des déchets des chantiers de BTP (étude de l'INSA pour l'ADEME en 1991-1993 ; Richer, 2001) :*

Paramètre sur éluat	***Valeur***
fraction soluble	*Faibles, sauf pour les matériaux comportant du*

	plâtre qui libèrent des ions sulfate et calcium
métaux	*faibles excepté pour les matériaux à base de ciment qui peuvent libérer des quantités importantes d'aluminium*

Résultats obtenus après lixiviation ou lessivage

(par application du protocole provisoire de lixiviation des déchets massifs et solidifiés : protocole SRETIE - Novembre 1991)

ADEME

rès lixiviation ou lessivage

(par échets massifs et solidifiés :

DEME

		AUX CONSIDERES COM			
		MATERIAUX			
Paramètres mesurés	Unité (1)	Béton de démolition	Béton CPA	Béton Cl-F	Limite de détection
conductivité	S/cm	183	452	125	
Humidité	% brut	3,2	5,2	5,45	
F.soluble	% LG	0,34	< 0,1	< 0,1	
COT	mg/kg de MS	< 60	53-74	113	2 mg/L
DCO	mg/kg de MS	< 300	179-390	< 317	10 mg/L
As	mg/kg de MS	< 0,15	< 0,16	< 0,16	5 µg/L
Cd	mg/kg de MS	< 0,03	< 0,032	< 0,032	1 µg/L
Cr	mg/kg de MS	< 0,3	< 0,32	< 0,32	10 µg/L
Cr6	mg/kg de MS	< 0,3	< 0,32	< 0,32	10 µg/L
Cu	mg/kg de MS	< 0,3	< 0,32	< 0,32	10 µg/L
Hg	mg/kg de MS	< 0,006	< 0,016	< 0,016	0,5 µg/L
Ni	mg/kg de MS	< 0,3	< 0,32	< 0,32	10 µg/L
Pb	mg/kg de MS	< 0,3	< 0,32	< 0,32	10 µg/L
Sn	mg/kg de MS	< 0,3	< 0,32	< 0,32	10 µg/L
V	mg/kg de MS	< 0,3	< 0,32	< 0,32	10 µg/L
Zn	mg/kg de MS	< 0,6	< 0,63	< 0,63	20 µg/L
Fluoranthène	mg/kg de MS				10 µg/L
Benzo b Fluoranthène	mg/kg de MS				10 µg/L
Benzo k Fluoranthène	mg/kg de MS				10 µg/L
Benzo a Pyrène	mg/kg de MS				10 µg/L
Benzo ghr pérylène	mg/kg de MS				20 µg/L
	mg/kg de MS				20 µg/L
Phénols	mg/kg de MS				50 µg/L
Ca	mg/kg de MS	556	1 381	526	1 mg/L
Al	mg/kg de MS	11,7	47,8	44,5	3 µg/L
Fe	mg/kg de MS		< 3,2	< 3,2	50 µg/L
Ti	mg/kg de MS				50 µg/L
Hydrocarbones totaux	mg/kg de MS				0,1 mg/L
Sulfates	mg/kg de MS				1 mg/L
Sulfures	mg/kg de MS				0,5 mg/L
Mn	mg/kg de MS				0,5 µg/L

(1) : l'unité ms solubles exprimées en %

- *Lixiviation sur des matériaux issus de la démolition de bâtiments et sur des matériaux prélevés dans un centre de tri (Abdelghafour et Méhu, 2001 ; Pépin, 2001 ; Domas, 2003).*

Paramètre sur éluat	***Valeur***
pH	*entre 7 et 12*
sulfates	*Variable (10-1600 mg/kg dans Abdelghafour et Méhu, 2001)*
carbone organique total (COT)	*< 300 mg/kg*
chrome	*en général inférieur à 0,4 mg/kg mais, sur un échantillon, une valeur de 1, 65 mg/kg a été mesurée*
zinc	*inférieur à 0,25 mg/kg*
baryum	*<140 mg/kg*
autres métaux	*inférieures ou proches des seuils de détection*

ammonium et en nitrates	*très variable, allant du non détectable à des concentrations 5 à 10 fois supérieures au seuil de détection*

Dans le rapport Abdelghafour et Méhu (2001), il est de plus précisé que les teneurs en HAP et HCT sur éluat sont inférieures ou proches des limites de détection.

- *Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest Carrillo L. et al. (2009) :*
  - *ADEME (2006) (étude source non retrouvée) :*

Paramètre sur éluat	***Valeur moyenne***
As	*<0,15 mg/kg MS*
Cd	*<0,03 mg/kg MS*
Cr	*<0,3 mg/kg MS*
Cu	*<0,3 mg/kg MS*
Hg	*<0,006 mg/kg MS*
Ni	*<0,3 mg/kg MS*
Pb	*<0,3 mg/kg MS*
Zn	*<0,6 mg/kg MS*
COT	*109 mg/kg MS*
DCO	*<300 mg/kg MS*
Fraction soluble	*0,97 %MS*
Conductivité électrique	*183 µS/cm*
pH	*Variable, souvent alcalin*
Mn	*Seraient légèrement supérieures aux seuils régementaires mais ne seraient pas dangereuses pour les plantes.*
Sulfates	

Adjuvants :
Des adjuvants sont ajoutés au cours de la fabrication des bétons (cf. paragraphe 0) afin de faciliter leur mise en œuvre ou améliorer leur comportement à long terme. Certains de ces adjuvants sont susceptibles de demeurer dans les granulats de béton concassé.

Alkali-réaction :
Réaction entre certains grains siliceux du béton et le ciment basique riche en alcalins en présence d'eau formant un gel de silice et induisant la facturation du béton. Il pourrait être intéressant de documenter les phénomènes de lixiviation susceptibles de survenir en cas de dégradation du béton par alkali-réaction.

Les impuretés potentielles
Les bétons recyclés provenant de bâtiments peuvent présenter des pollutions issues des parements du béton (plâtre, peinture, papier peint, etc.) et des produits fabriqués ou stockés dans le bâtiment.

Toxicité/Ecotoxicité
La toxicité du béton n'a pas réellement été mise en évidence. Cependant, une étude expérimentale sur le rat (Lee et al., 2007) a mis en évidence une augmentation des signes cliniques en hiver chez les rats exposés au béton par rapport aux rats non exposés.

Caractéristiques strictement agronomiques des matériaux

Le pH du granulat de béton recyclé dépend notamment de la quantité de pâte de ciment qui le compose et de son taux de carbonatation. En effet, le ciment, constitué de silicates et aluminates de calcium hydratés, va conférer au matériau un caractère alcalin.

Cependant, en cas de contact avec l'air, la carbonatation de la chaux résiduelle va progressivement faire baisser ce pH au cours du temps (site internet OFRIR).

Pas de donnée retrouvée pour les autres paramètres de fertilité.

Néanmoins, potentiel améliorant identifié : De par sa granulométrie et la composition du ciment, l'incorporation de granulats de béton recyclé à des matériaux fins pourrait améliorer la fertilité du mélange par :
- une action sur la structure du sol (allègement) ;
- un effet neutralisant.

Caractéristiques strictement mécaniques des matériaux

Les propriétés géotechniques des matériaux issus du recyclage des bétons et des matériaux de chaussée (naturels ou traités aux liants hydrauliques) dépendent d'une part des matériaux bruts, et d'autre part du mode d'élaboration, en particulier du concassage.
Les caractéristiques intrinsèques de ces matériaux recyclés sont faibles et comprises en général dans les fourchettes suivantes (site internet OFRIR) :

- *résistance à la fragmentation, LA compris entre 25 et 50,*
- *résistance à l'attrition, MDE compris entre 15 et 50,*

Des granulats de bétons recyclés, auxquels ont été incorporés des fragments de brique en proportion et de granularité variables, ont été soumis à des essais géotechniques de différente nature : Proctor, portance CBR et cisaillement direct à la boite de Casagrande (Boudlal O. et Melbouci B., 2010).
Les granulats de bétons ont été constitués par tri, concassage et tamisage de fragments de béton. Les résultats obtenus montrent que :

- le coefficient de LA est égal à 31 ;
- le coefficient MDE est égal à 34.

Les résultats des différents essais réalisés ont montré que les mélanges granulats de béton recyclé et de fragments de brique soumis aux différentes sollicitations présentaient un « comportement appréciable ».
« L'ajout de brique sous la forme de grains inferieurs à 0,125 mm en proportion ne dépassant pas 5% a conduit à des mélanges avec un comportement très satisfaisant proche à celui des granulats naturels sous les différentes sollicitations. »

La présence de plâtre en mélange dans les matériaux recyclés peut être problématique car les sulfates peuvent engendrer des gonflements par formation d'ettringite, entraînant ainsi la dégradation prématurée de la chaussée.
La teneur en sulfate est mesurée conformément à la norme XP P 18 581 ; le seuil retenu dans le guide technique d'Ile de France est de 0,7 % pour l'utilisation en couche de forme ou en couche de chaussée, ce qui correspond au code SSb selon la norme XP P 18-545. Ce seuil est réduit à 0,2% (code SSa) en cas d'emploi sous dallage de bâtiment (site internet OFRIR du LCPC).

Des phénomènes d'alkali-réaction sont susceptibles de se produire et de fracturer les grains des matériaux (attaque de certains grains siliceux en présence d'eau par le ciment basique et alcalin).

Bibliographie :

Abdelghafour M., Méhu J. (2001) Evaluation du comportement environnemental de déchets de démolition, rapport final - INSAVALOR division POLDEN à la demande de l'ADEME, février 2001.

ADEME (1996). Comportement à la lixiviation de matériaux considérés comme inertes et de produits naturellement exposés à l'action de l'eau.

Boudlal O. et Melbouci B. (2010) Recyclage des granulats de démolition (brique et béton) dans les corps de chaussées, Communication Science & technologie N° 8, Janvier 2010, pp.51-56.

Carrillo L., Emile F., Castaldi G., Perrin B. et Wagner C. (2009). Matériaux minéraux potentiellement utilisables en espaces verts : matériaux alternatifs pour les mélanges Terre-Pierre établis à partir de la classification européenne des déchets. Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest.

CIMBETON (Centre d'information sur le ciment et ses applications) (2005) Les constituants des bétons et des mortiers, Fiche technique G10-Tome 1, collection Technique Cimbéton.

CIMBETON (Centre d'information sur le ciment et ses applications) (2006) Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, Fiche technique G11-Tome 2, collection Technique Cimbéton.

Domas J. (2003) Caractérisation de trois déchets minéraux à l'aide de l'essai de percolation pr EN 14 405, rapport final INERIS, financé par l'ADEME, mars 2003.

Site internet DREAL Franche-Comté : http://www.franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/article.php3?id_article=485

Laboratoire d'étude et de recherche sur les matériaux (LERM) (2007) Newsletter n°8 de mai 2007 : http://www.lerm.fr/lerm/Newsletter/Newsletter8/lerm_Newsletter8_granulatrecycle1.shtml
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg (1989) Etude des matériaux issus du concassage de produits de démolition…

Site internet OFRIR (Observatoire français du Recyclage dans les Infrastructures routières) :

http://ofrir.lcpc.fr/accueil/accueil_articles_theme.php?produit=69&theme=17&produit_nom=Mat%20de%20démolition%20BTP&theme_nom=Résumé&id_menu=14

Pépin G. (2001) Caractérisation de quatre déchets minéraux à l'aide d'essais ANC, FMM, Percolation et lixiviation, rapport final INERIS à la demande de l'ADEME, octobre 2001.

Lee SW, Yang YS, Ahn TH, Bae CS, Moon CJ, Kim SH, Song SY, Hwang HZ, Kim JC. (2007) Subacute toxicity evaluation in rats exposed to concrete and hwanto building environments, Environmental toxicology, volume 22, pp. 264-274.

Richer G. avec la collaboration de Carbonnier P., Koch-Mathian J.-Y. (2001) Matériaux de démolition en région Nord-Pas-de-Calais : Recommandations de stockage et de recyclage, Rapport BRGM/RP-50604-FR, 54 p.

Trinel B. (2009) Fin de vie et recyclage des materiaux du batiment, Laboratoire d'étude et de recherche sur les matériaux (LERM), Présentation au Salon BatiEco 2009. http://www.materiatech-carma.net/html/pdf/actesbatieco09/TRINEL-findevieetrecyclage.pdf.

Mélanges de béton, briques, tuiles et céramiques (autres que ceux visés à la rubrique 17-01-06) issus de la démolition : 17-01-07

17 01 07	mélanges de béton, briques, tuiles et céramiques autres que ceux visés à la rubrique 17 01 06.	Béton, briques, tuiles et céramiques :	Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)

Cette rubrique inclut les mélanges de béton, briques, tuiles et céramiques ne contenant pas de substances dangereuses issus de la démolition dans le secteur du bâtiment.

Disponibilité

Importance du gisement (tonnage produit par an)

Trois sources d'information sont identifiées :

- Données des années 1990 - Guide Ademe "déchets du bâtiment" volume 1 de 1998 :
  - base de ciment, mortier et béton = 3 056 100 T/an
  - béton armé = 2 308 900 T/an
  - céramiques = 998 300 T/an
  - céramique, argile et terre cuite : 10 900 T/an
  - argile et terre cuite : 429 200 T/an
- Les données de l'ADEME (1998 et 2003) traitées par O. Damas –Plante & Cité ci-dessous fournissent des indications sur les déchets inertes en mélange issus du secteur du bâtiment

en tonnes par an	Construction neuve	Réhabilitation construction	Réhabilitation déposé	Démolition	**Tout chantier**
Produits inertes mélangés	ND	31 074	4 930 924	ND	**4 961 998**
Brique + ciment	ND	ND	ND	542 046	**542 046**
Pierre + ciment	ND	ND	ND	3 287 347	**3 287 347**

Sur la base de ces données, les tonnages de déchets de démolition en mélange produits annuellement représentent 56 % du tonnage des déchets inertes issus du secteur du bâtiment.

Variabilité de la production dans le temps

Gisement qui ne connait a priori pas de variations saisonnières.

Répartition du gisement sur le territoire Français

Les zones de production sont les grandes agglomérations qui sont susceptibles d'offrir un potentiel régulier de matériaux de démolition.
Le tableau suivant fournit la répartition de la production de déchets inertes issus du BTP sur le territoire français (Document P&C ; ADEME, 1998 - Données des années 1990). On peut estimer en première approche que cette répartition s'applique aux déchets du type béton, briques, tuiles et céramiques issus de la démolition.

Région	Production annuelle de déchets inertes Tonnes/an
Alsace	545 000
Aquitaine	608 000
Auvergne	355 000
Bourgogne	343 000
Bretagne	757 000
Centre	464 000
Champagne-Ardenne	275 000
Corse	42 000
Franche-Comté	279 000
Ile-de-France	4 764 000
Languedoc-Roussillon	633 000
Limousin	113 000
Lorraine	460 000
Midi-Pyrénées	573 000
Nord-Pas-de-Calais	723 000
Basse-Normandie	270 000
Haute-Normandie	271 000
Pays-de-la-Loire	586 000
Picardie	360 000
Poitou-Charentes	278 000
PACA	1 188 000
Rhône-Alpes	1 750 000
Total	**15 637 000**

La répartition du gisement est donc globalement homogène sur le territoire français.

Existence de filières de valorisation et importance de ces filières

Après l'enquête de l'ADEME auprès de 26 installations de recyclage (ADEME, 2008), les déchets du bâtiment de type démolition et inertes mélangés représenteraient 24% de l'ensemble des déchets du bâtiment et des travaux publics (BTP) transitant par ces installations.
Ces matériaux inertes recyclés, issus de procédés de tri, concassage et criblage, représentent 47% des déchets inertes entrants dans ces 26 installations. Les produits recyclés sont de plusieurs types :

- Recyclé tout venant : 19%
- Recyclé béton-enrobé : 11%
- Recyclé tout béton : 9%
- Recyclé tout enrobe : 3%
- Recyclé ballast et cassons : 5%

Les autres 53 % des flux entrants sont des matériaux qui ne subissent pas de traitement spécifiques hors criblage pour être recyclés (30 %) (Il s'agit des terres, remblais et sables) et des matériaux qui sont destinés au stockage (23 %).
La manière dont se répartissent les 24 % de déchets de démolition mélangés entrants dans ces installations entre les différents produits recyclés et le stockage n'est pas précisée.

Provenance urbaine du déchet

Ces déchets sont issus du renouvellement urbain.

Cadre / Statut réglementaire

Les mélanges de béton, briques, tuiles et céramiques issus de chantiers de démolition et ne contenant pas de substances dangereuses sont des «déchets inertes » vis à vis de la mise en décharge (à l'exclusion du plâtre).

Circulaire MATE/MELT du 15 février 2000 décrit la mise en place d'une planification de la gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics (mise en place de plans départementaux de gestion des déchets de chantiers du bâtiment et des travaux publics).

Caractéristiques générales des matériaux

Composition

Les déchets constitués de mélanges de béton, briques, tuiles et céramiques sont susceptibles d'être utilisés pour la production de 3 types de recyclés (ADEME, 2008) :

- recyclés tout béton : granulats obtenus via un processus de recyclage, à partir de 95% de produits en béton ;
- recyclés tout venant : granulats obtenus via un processus de recyclage, à partir de matériaux concassables (fragments de roches massives, bétons, moellons, briques, etc.) en proportions variables ;
- recyclés spécifiques : granulats recyclés pouvant prendre l'appellation du produit de base, composés d'un ou plusieurs matériaux spécifiques (briques, tuiles, etc.).

La composition de ces déchets dépend donc de la proportion des différents matériaux en mélange :

- Composition élémentaire du béton (cf. fiche « Béton issu de la construction et de la démolition » 17 01 01) : ciment de nature variable (le plus souvent : majoritairement du clinker[9] et dans une moindre mesure d'autres constituants), granulats représentant 70 % de la masse du béton (le plus souvent : granulats ou laitiers), adjuvants (produits chimiques variables ajoutés en faible quantité, < 3 % chacun).
- Composition élémentaires des briques, tuiles et céramiques (cf. fiche « Déchets de produits en céramique, briques, carrelage et matériaux de construction (après cuisson) » 10 12 08) : pour les terres cuites traditionnelles, mélange d'argiles (silicates d'alumine – exemple smectite, kaolinite, illite) et/ou de limons, offrant la plasticité à la pâte, et de quartz, sable, feldspaths, basalte, andésite, porphyre, chamotte, calcite, schiste, pour fournir la structure à la céramique (squelette), réduire la température de fusion lors de la cuisson (fondant) et réduire la plasticité de la pâte

Humidité/matière sèche, Fraction organique / Fraction minérale / Teneur en matière organique, Granulométrie/texture, Densité, Porosité, Couleur

Les caractéristiques de teneur en matière sèche, de granulométrie, de densité, de porosité des granulats recyclés sont dépendantes des opérations de traitements citées au paragraphe 0.
Différentes granulométries de granulats issus de la démolition sont produites (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest – Carrillo et al., 2009) :

- Fines : O/D avec D≤ 0,08mm ;
- Sables : O/D avec D ≤ 6,3 mm ;
- Gravillons : d/D avec d ≥ 2mm et D≤ 31,5mm ;
- Cailloux : d/D avec d ≥ 20mm et D≤ 80mm ;
- Graves : O/D avec 6,3mm < D≤ 80mm ;

Aucune donnée spécifique au mélange de béton, briques, tuiles et céramiques n'a été retrouvée.

- Propriétés des granulats de bétons recyclés (cf. fiche « Béton issu de la construction et de la démolition » 17 01 01) : Le tableau suivant fournit un exemple de caractéristiques physiques de granulats de béton recyclé (Boudlal et Melbouci, 2010) :

[9] Clinker = granules obtenues à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respective moyenne de 80 %/20 %

Caractéristiques déterminées	Moyenne
Teneur en eau naturelle : w (%)	2,40
Masse volumique des grains solides : ρ_s (g/cm^3)	2,62
Masse volumique sèche : ρ_d (g/cm^3)	1,76
Masse volumique humide : ρ_h (g/cm^3)	1,80
Indice des vides : e (%)	49
Porosité : n (%)	33
Degré de saturation : Sr (%)	1,5

D'après les données relatives aux installations de recyclage des bétons, il semble que les fragments de bétons soient généralement concassés de telle sorte que la taille des granulats soit inférieure à 100 à 150 mm (en tout cas pour la réutilisation en technique routière).

- Granulats de terre cuite (cf. fiche « Déchets de produits en céramique, briques, carrelage et matériaux de construction (après cuisson) » 10 12 08) : Des données de granulométrie et densité ci-dessous, relatives aux déchets de terre cuite, sont fournies dans le Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest (Carrillo et al., 2009) (cf. tableau ci-dessous).

Paramètre	Valeur min	Valeur max	Références
Granulométrie	50	100	Entreprise Rairies Montrieux, 49430 Les Rairies Dominique Rioux : 02-41-21-15-37, d.rioux@montrieux.fr
Densité apparente	1,3	1,9	

Caractéristiques de dangerosité des matériaux (présence de substances, impacts)

Teneurs en substances chimiques

Pas de données disponibles pour les mélanges de béton, briques, tuiles et céramiques.
D'une manière générale, les matériaux recyclés provenant de bâtiments peuvent présenter des pollutions issues des parements murs (plâtre, peinture, papier peint, etc.) et des produits fabriqués ou stockés dans ces bâtiments.

- En ce qui concerne les bétons (cf. fiche « Béton issu de la construction et de la démolition » 17 01 01) :

  Des adjuvants sont ajoutés au cours de la fabrication des bétons (cf. paragraphe 0) afin de faciliter leur mise en œuvre ou améliorer leur comportement à long terme. Certains de ces adjuvants sont susceptibles de demeurer dans les granulats de béton concassé.
- En ce qui concerne les terres cuites (cf. fiche « Déchets de produits en céramique, briques, carrelage et matériaux de construction (après cuisson) » 10 12 08) :

  Karius et Hamer (2001) fournissent des données de teneurs, en éléments majeurs et traces sur brut pour 9 échantillons concassés de briques issues de briqueteries européennes et disponibles sur le marché (B1 à B9)

Table 1
Total content of the sediment brick (SB) made from 50% wt. harbour sediment, harbour sediment (HS) and nine commercial bricks (B1-B9, type: face bricks)

	Unit	SB	HS	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
Na	[g/kg]	5.4	4.6	3.8	2.9	4.8	5.0	3.1	5.9	1.8	3.4	2.5
Mg	[g/kg]	9.1	8.4	4.2	4.7	7.5	7.9	5.9	6.6	2.4	6.1	6.2
Al	[g/kg]	96	53	57	78	77	80	88	51	89	91	66
K	[g/kg]	27	17	17	20	24	25	23	17	16	23	18
Ca	[g/kg]	19	20	3.2	2.5	4.2	4.4	6.3	15	2.0	6.2	17
Fe	[g/kg]	54	45	33	43	40	41	41	30	73	44	30
S as SO_4	[g/kg]	3.2	12	< 0.50	< 0.50	< 0.50	< 0.50	1.8	< 0.50	< 0.50	1.7	< 0.50
V	[g/kg]	0.14	0.082	0.074	0.10	0.10	0.10	0.13	0.061	0.12	0.12	0.093
Cr	[g/kg]	0.16	0.13	0.067	0.10	0.091	0.094	0.10	0.068	0.19	0.087	0.086
Mn	[g/kg]	0.96	1.39	0.48	0.37	1.5	1.4	26	14	19	2.5	0.26
Ni	[mg/kg]	69	60	26	32	49	48	68	37	57	60	35
Cu	[mg/kg]	71	87	16	22	32	82	38	22	32	33	21
Zn	[g/kg]	0.45	0.79	0.073	0.075	0.093	0.094	0.10	0.095	0.37	0.073	0.080
As	[mg/kg]	18	20	16	15	14	14	17	14	11	14	11
Sr	[g/kg]	0.17	0.19	0.068	0.064	0.15	0.14	0.16	0.12	0.12	0.15	0.14
Mo	[mg/kg]	0.82	2.5	< 0.26	< 0.26	< 0.26	< 0.26	2.8	< 0.26	0.50	< 0.26	< 0.26
Cd	[mg/kg]	2.0	6.5	0.70	< 0.019	0.10	0.30	0.70	0.20	< 0.019	< 0.019	< 0.019
Ba	[g/kg]	2.8	0.64	0.36	0.34	1.0	1.0	2.8	0.54	2.0	2.8	2.7
Pb	[g/kg]	0.092	0.16	0.021	0.024	0.025	6.4	0.028	0.034	0.20	0.022	0.019

Données de percolation/lixiviation

Les données caractéristiques des lixiviats (ces lixiviats sont obtenus par des essais de percolation dans des casiers, avec des ratios L/S variant entre 0,013 et 0,145) issus de 2 types de mélanges sont fournies par Méhu et al. (2000) :

- Casier G : déchets de démolition en mélange auxquels peuvent être adjoints certains déchets industriels à faible potentiel polluant ;
- Casier H : terre de chantiers non pollués (80% du volume) et déchets de démolition triés à 5% de plâtre (20% du volume) auxquels peuvent être ajoutés certains déchets industriels à très faible potentiel polluant.

Paramètres	Normes	Percolats					Seuils provisoires du Ministère		Relargages cumulés à
							Seuil H (mg/l)	Seuil G (mg/l)	L/S = 0,145 (mg/kg MS)
Résultats d'analyses du casier G									
Ratio cumulé L/S =		0.013	0.027	0.042	0,075	0,145			
pH	NF T 90-008	7,29	7,49	9,27	11,28	11,54			
Conductivité (µS/cm à 20°C)	NF T 90-031	4022	4426	4173	4178	4053			
Fraction soluble (mg/l)	NF T 90-029	3626	3873	3693	3578	3686			
Sulfates (mg/l)	NF T 90-042	1240	1344	1201	1242	1442	500	1600	196,8
Chlorures (mg/l)	NF T 90-042	838	909	814	650	746	400	1300	95,39
Cyanures libres (mg/l)	NF T 90-107	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,3	< 0,1
DCO (mg(O2)/l)	NF T 90-101	500	440	425	490	480	60	200	68,7
COT (mg/l)	NF T 90-102	110	110	110	130	142			18,818
HAP (6) (mg/l)	NF T 90-115	0,000 02 (sur le mélange ratio cumulé 1)					0,002	0,005	<< 0,002
HCT (mg/l)	NF T 90-114	< 0,5 (sur le mélange ratio cumulé 1)					2	5	< 0,5
Indice Phénol (mg/l)	NF T 90-109	2,5	0,56	1,94	1,98	3,36	0,2	0,5	0,369
Arsenic (mg/l)	NF EN ISO 11885	0,17	< 0,06	< 0,06	0,06	0,06	0,2	0,5	0,010
Cadmium (mg/l)	NF EN ISO 11885	0,006	< 0,005	0,014	0,005	0,005	0,01	0,03	0,0005
Chrome (mg/l)	NF EN ISO 11885	0,28	0,047	0,208	0,043	0,07	0,1	0,3	0,019
Chrome VI (mg/l)	NF T 90-043	0,11	0,017	0,195	0,03	0,07			0,016
Cobalt (mg/l)	NF EN ISO 11885	0,082	< 0,01	< 0,01	0,015	0,016	0,1	0,3	0,003
Cuivre (mg/l)	NF EN ISO 11885	0,08	0,06	0,025	0,03	0,075	0,1	0,3	0,011
Molybdène (mg/l)	NF EN ISO 11885	< 0,03	< 0,03	0,05	0,057	0,055	0,1	0,3	0,009
Mercure (mg/l)	NF EN 1483	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	0,002	0,005	< 0,0005
Nickel (mg/l)	NF EN ISO 11885	0,095	0,035	0,01	0,02	0,03	0,1	0,3	0,005
Plomb (mg/l)	NF EN ISO 11885	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,1	0,3	< 0,05
Sélénium (mg/l)	NF EN ISO 11885	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	0,05	< 0,01
Vanadium (mg/l)	NF EN ISO 11885	0,025	0,016	0,035	0,021	0,031			0,004
Zinc (mg/l)	NF EN ISO 11885	0,194	0,077	0,17	0,013	0,023	0,5	1,5	0,008
Résultats d'analyses du casier H									
Ratio cumulé L/S =		0.014	0.028	0.042	0,075	0,145			
pH	NF T 90-008	7,91	7,74	8,12	7,83	7,98			
Conductivité (µS/cm à 20°C)	NF T 90-031	877	1210	1495	1833	1667			
Fraction soluble (mg/l)	NF T 90-029	744	1050	1378	1662	1632			
Sulfates (mg/l)	NF T 90-042	291	408	538	708	696	500	1600	124,0
Chlorures (mg/l)	NF T 90-042	31,5	33,3	61,2	124	41	400	1300	8,74
Cyanures libres (mg/l)	NF T 90-107	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,3	< 0,1
DCO (mg(O_2)/l)	NF T 90-101	10	15	18	28	9	60	200	2,16
COT (mg/l)	NF T 90-102	3,9	4,6	6,1	6,1	5,7			0,805
HAP (6) (mg/l)	NF T 90-115	0,000 002 (sur le mélange ratio cumulé 1)					0,002	0,005	<< 0,002
HCT (mg/l)	NF T 90-114	< 0,5 (sur le mélange ratio cumulé 1)					2	5	< 0,5
Indice Phénol (mg/l)	NF T 90-109	0,103	0,008	0,013	0,008	0,1	0,2	0,5	0,016
Arsenic (mg/l)	NF EN ISO 11885	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	0,2	0,5	< 0,06
Cadmium (mg/l)	NF EN ISO 11885	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,005	0,005	0,01	0,03	0,0007
Chrome (mg/l)	NF EN ISO 11885	0,043	0,045	0,064	0,095	0,07	0,1	0,3	0,010
Chrome VI (mg/l)	NF T 90-043	0,043	0,045	0,064	0,095	0,07			0,010
Cobalt (mg/l)	NF EN ISO 11885	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,1	0,3	< 0,01
Cuivre (mg/l)	NF EN ISO 11885	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,1	0,3	< 0,01
Molybdène (mg/l)	NF EN ISO 11885	< 0,03	< 0,03	0,03	<0,03	<0,03	0,1	0,3	< 0,03
Mercure (mg/l)	NF EN 1483	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	0,002	0,005	< 0,0005
Nickel (mg/l)	NF EN ISO 11885	< 0,02	< 0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,1	0,3	< 0,02
Plomb (mg/l)	NF EN ISO 11885	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,1	0,3	< 0,05
Sélénium (mg/l)	NF EN ISO 11885	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	0,05	< 0,01
Vanadium (mg/l)	NF EN ISO 11885	< 0,01	< 0,01	0,029	0,021	0,018			0,002
Zinc (mg/l)	NF EN ISO 11885	0,035	0,029	0,059	0,052	0,015	0,5	1,5	0,004

*Légende : > seuils H et < seuils G > seuils G

Tableau extrait de Méhu et al. (2000)

Le pH du matériau recyclé dépend notamment de la quantité de pâte de ciment qui le compose et de son taux de carbonatation. En effet, ce matériau est constitué de silicate d'aluminium et de calcium hydratés, qui vont lui conférer un caractère alcalin. En cas de contact avec l'air, la carbonatation de la chaux résiduelle va faire baisser ce pH au cours du temps.

La présence de béton peut être le facteur qui explique une augmentation du pH dans la fraction A. dans la fraction B il reste stable, ce qui est intéressant pour une utilisation en Espaces Verts.
La conductivité électrique et de fraction soluble sont 2 à 4 fois plus importantes en A. Cela est cohérent du fait que le matériau A contient quatre fois plus de déchets de démolition que le B.
Le site internet OFRIR fournit également des résultats d'analyse sur éluat après des essais de lixiviation. Ces résultats ne portent pas exclusivement sur les granulats issus de mélanges de béton, briques, tuiles et céramiques :

- *Lixiviation sur un matériau issu du concassage de produits de démolition et caractérisation de l'éluat (LRPC Strasbourg, 1989) :*

Paramètre sur éluat	***Valeur***
pH	*faiblement alcalin (supérieur à 10)*
aluminium	*teneur assez forte*
métaux lourds	*teneurs très faibles*

- *Lixiviation sur différents matériaux issus des déchets des chantiers de BTP (étude de l'INSA pour l'ADEME en 1991-1993 ; Richer, 2001) :*

Paramètre sur éluat	***Valeur***
fraction soluble	*Faibles, sauf pour les matériaux comportant du plâtre qui libèrent des ions sulfate et calcium*
métaux	*faibles excepté pour les matériaux à base de ciment qui peuvent libérer des quantités importantes d'aluminium*

- *Lixiviation sur des matériaux issus de la démolition de bâtiments et sur des matériaux prélevés dans un centre de tri (Abdelghafour et Méhu, 2001 ; Pépin, 2001 ; Domas, 2003) :*

Paramètre sur éluat	***Valeur***
pH	*entre 7 et 12*
sulfates	*Variable (10-1600 mg/kg dans Abdelghafour et Méhu, 2001)*
carbone organique total (COT)	*< 300 mg/kg*
chrome	*en général inférieur à 0,4 mg/kg mais, sur un échantillon, une valeur de 1, 65 mg/kg a été mesurée*
zinc	*inférieur à 0,25 mg/kg*
baryum	*<140 mg/kg*
autres métaux	*inférieures ou proches des seuils de détection*
ammonium et en nitrates	*très variable, allant du non détectable à des concentrations 5 à 10 fois supérieures au seuil de détection*

Dans le rapport Abdelghafour et Méhu (2001), il est de plus précisé que les teneurs en HAP et HCT sur éluat sont inférieures ou proches des limites de détection.

Hétérogénéité des matériaux

La qualité des matériaux est très variable.

Données d'écotoxicité et de toxicité

Pas de donnée disponible pour les mélanges de béton, briques, tuiles et céramiques.
Le site internet OFRIR identifie des risques sanitaires potentiels :

- « avant et après traitement, puisque les matériaux sont davantage exposés au lessivage par les eaux de pluie ;
- au niveau de la fabrication et de la préparation puisque les actions mécaniques de concassage et de criblage engendrent des fines et poussières. »

Caractéristiques strictement agronomiques des matériaux

Des données relatives au pH et au COT des éluats produits pas ces matériaux sont présentées en section 0.
Selon le Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest (Carrillo et al., 2009), le site internet Travaux publics et Services gouvernementaux Canada fournit des valeurs de perméabilité, reprises dans le tableau ci-dessous, pour deux matériaux de granulométrie différente, constitués à 80 % de tout venant et 20 % de déchets de démolition triés (5% de plâtre). Cette information sur le site internet précité n'a pas été retrouvée.

Paramètre	Valeur
Perméabilité K (≤20mm)	$9{,}2\times10^{-4}$m/s
Perméabilité K (≤4mm) 80% tout venant, 20% déchets de démolition triés (5% plâtre)	$7{,}9\times10^{-4}$m/s

Caractéristiques strictement mécaniques des matériaux

Les propriétés géotechniques des matériaux issus du recyclage des bétons et des matériaux de chaussée (naturels ou traités aux liants hydrauliques) dépendent d'une part des matériaux bruts, et d'autre part du mode d'élaboration, en particulier du concassage.
Les seules données disponibles portent sur les granulats de béton recyclés. Les caractéristiques intrinsèques de ces matériaux recyclés sont faibles et comprises en général dans les fourchettes suivantes (Site internet OFRIR) :

- résistance à la fragmentation, LA compris entre 25 et 50,
- résistance à l'attrition, MDE compris entre 15 et 50.

La présence de plâtre en mélange dans les matériaux recyclés peut être problématique car les sulfates peuvent engendrer des gonflements par formation d'ettringite, entraînant ainsi la dégradation prématurée du matériau. La teneur en sulfate est mesurée conformément à la norme XP P 18 581 ; le seuil minimum retenu dans le guide technique d'Ile de France est de 0,7 % pour l'utilisation en couche de forme ou en couche de chaussée, ce qui correspond au code SSb selon la norme XP P 18-545. Ce seuil est réduit à 0,2% (code SSa) en cas d'emploi sous dallage de bâtiment (Site internet OFRIR).
Des phénomènes d'alkali-réaction sont susceptibles de se produire et de fracturer les grains de béton concassé (attaque de certains grains siliceux en présence d'eau par le ciment basique et alcalin).

Bibliographie :

Abdelghafour M. et Méhu J. (2001) « Evaluation du comportement environnemental de déchets de démolition », rapport final - INSAVALOR division POLDEN à la demande de l'ADEME, février 2001.
ADEME (1996) Comportement à la lixiviation de matériaux considérés comme inertes et de produits naturellement exposés à l'action de l'eau.
ADEME (1998) Guide Ademe "déchets du bâtiment", volume 1.
ADEME (2008) Déchets du BTP : Gisement, filières, perspectives d'évolution, Note d'information – Document de travail d'Avril 2008 rédigé par L. Château.
Boudlal O. et Melbouci B. (2010) Recyclage des granulats de démolition (brique et béton) dans les corps de chaussées, Communication Science & technologie N° 8, Janvier 2010, pp.51-56.
Carrillo L., Emile F., Castaldi G., Perrin B. et Wagner C. (2009). Matériaux minéraux potentiellement utilisables en espaces verts : matériaux alternatifs pour les mélanges Terre-Pierre établis à partir de la classification européenne des déchets. Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest.
Domas J. (2003) Caractérisation de trois déchets minéraux à l'aide de l'essai de percolation pr EN 14 405, rapport final INERIS, financé par l'ADEME, mars 2003.
Karius V. et Hamer K. (2001) pH and grain-size variation in leaching tests with bricks made of harbour sediments compared to commercial bricks, The Science of The Total Environment, Volume 278, Issues 1-3, 20 October 2001, Pages 73-85.
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg (1989) Etude des matériaux issus du concassage de produits de démolition…
Méhu J., Abdelghafour M., Brula P. (2000) Etude du comportement de déchets dans différents scénarios de classe III, INSAVALOR, division POLDEN.
Site internet OFRIR (Observatoire français du Recyclage dans les Infrastructures routières) : http://ofrir.lcpc.fr/portail_lcpc/html/accueil/accueil_articles_theme.php
Pépin G. (2001) Caractérisation de quatre déchets minéraux à l'aide d'essais ANC, FMM, Percolation et lixiviation, rapport final INERIS à la demande de l'ADEME, octobre 2001.
Document Plante & Cité "Partie 3 : Sélection, gisements et localisation des sources de déchets potentiels pour une construction de sols fertiles.
Richer G. (2001) Matériaux de démolition en région Nord-Pas-de-Calais : recommandations de stockage et de recyclage, Etude BRGM – DRIRE Nord-Pas-de-Calais, avril 2001.
Site internet Travaux publics et Services gouvernementaux Canada : http://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/biens-property/gd-env-cnstrctn/anne-fra.html#e7

Terres excavées : 17-05-04

17 05 04	Terres et cailloux autres que ceux visés à la rubrique 17 05 03	Terres (y compris déblais provenant de sites contaminés), cailloux et boues de dragage :	Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)

Les terres excavées sont issues de chantiers nécessitant un terrassement, ou encore de travaux de dépollution avec envoi des terres contaminées en centre de traitement. Dans ce dernier cas, les terres contiennent des polluants en plus ou moins grande concentration.

Les sols sont constitués en mélange de **limons, d'argiles, de sables, et de matières organiques**. La part des limons argiles et sables dans la composition d'un sol déterminent sa **granulométrie**.

Il existe une grande **variabilité de composition** des sols, y compris à échelle locale, ainsi qu'une variabilité au sein même d'un profil, selon la profondeur. Un sol en place est en effet constitué de plusieurs couches (appelées « horizons ») qui présentent des différences de composition : les horizons de surface sont par exemple souvent bien plus riches en matière organique.

Ainsi, il est difficile de fournir une caractérisation précise et unique des terres excavées. Cette fiche se basera donc sur le comportement physico-chimique moyen d'un sol urbain quand les données sont disponibles, ou d'un sol agronomique moyen dans le cas contraire.

Caractéristiques physiques des matériaux

Portance

Aucune valeur chiffrée correspondant à une mesure de ce paramètre n'a pu être trouvée.

Notons malgré tout que des terres excavées ne peuvent avoir une portance similaire à celle d'un sol en place. La structure du sol est détruite par l'action mécanique du terrassement. Des macropores sont créés. Le matériau contient une quantité de vide qui diminue la portance.

On peut penser que la portance de ce matériau sera faible à moyenne, et ce en fonction de la granulométrie du matériau excavé.

Portance	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Forte

Conductivité des lixiviats

Cette mesure est effectuée sur des terres issues de terrassement, et dont on cherche à établir la destination.

Cette valeur pourra être trouvée grâce à l'obtention de bulletins d'analyse de terres.

Densité apparente

On peut ici formuler la même remarque que pour la portance : l'excavation détruit la structuration du sol.

Les sols urbains en place sont tassés, et ont une porosité réduite. La porosité d'un sol urbain tassé en place est en effet comprise entre 27 et 36%, au lieu de 40 à 50% pour un sol agricole. Un remblai supérieur situé à une profondeur de 5 à 25 cm présente une densité apparente de 1,69 (+- 0,11)

Mais dès lors que ces sols tassés sont excavés, une forte porosité est créée, qui diminue de ce fait la densité apparente des terres.

[Source : Sous les pavés, la terre, connaître et gérer les sols urbains ; C. Cheverry, C. Gascuel ; Omniscience, 2009]

Ainsi, on peut penser qu'il est préférable de prendre pour mesure de la densité apparente de terres excavées la mesure de densité apparente d'un sol agricole fortement poreux.

La densité apparente des sols agricoles est comprise **entre 1,2 et 1,7 en moyenne**.

[Source : Caractéristiques physiques des couvertures pédologiques, B. Jabiol, Présentation FIF-ENGREF, 2003]

Une étude de la FAO fait état d'une fourchette de densité apparente de 1,1 à 1,6, correspondant à des sols dont la porosité totale est comprise entre 58 et 39%. Si l'on se place dans le cas d'un sol agricole poreux, on se place donc dans la **fourchette basse (proche des 1,1) pour la densité apparente correspondante**.

[Source : Etudes et prospections pédologiques en vue de l'irrigation, Bulletin pédagogique de la FAO 42, FAO 1990]

Enfin, d'après l'ouvrage « Sous les pavés, la terre », les **propriétés physiques des sols reconstitués** (qui s'apparentent aux terres excavées) sont particulières. Ils présentent des **densités apparentes faibles en surface** (environ 1,3 en surface, et 1,2 entre 20 et 40 cm de profondeur), qui s'expliquent notamment par leur mélange (dans le cas étudié) à du compost. **En profondeur, la densité apparente augmente**, dépassant les 1,4 entre 40 et 120 cm de profondeur.

On retiendra ici une fourchette allant de 1,1 à 1,4.

Perméabilité à l'eau

La porosité créée lors de l'excavation, évoquée plus tôt, sera responsable de l'augmentation de la perméabilité à l'eau des terres étudiées. La perméabilité à l'eau d'un sol en place dépend en effet directement de sa granulométrie, et de l'agencement de ses agrégats, lesquels sont partiellement détruits lors du terrassement.

Plusieurs fourchettes ont été trouvées pour ce paramètre :

Source	Fourchette	Remarques
Le devenir de l'eau dans le sol, support de cours AgroParisTech, C. Chenu, 2008. *Valeurs extraites de Bruckler, 1998.*	10^{-11} à 10^{-6} m/s	Conductivité hydraulique à saturation sur sols dont la composition va de : sables très fins/limons à argiles limoneuses/argiles
FAO	10^{-8} à 10^{-6} m/s.	La FAO fournit des valeurs du paramètre Ks pour différents types de sols. La catégorie « mélanges de sables, limons et argiles » semble la plus pertinente à considérer dans leur classification. Elle y est associée à la mention « perméabilité modérée »

[Source FAO: ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f09.htm]

On peut imaginer que la perméabilité de terres excavées est légèrement supérieure aux fourchettes évoquées ci-dessus, puisqu'on rappelle qu'il s'agit d'un sol déstructuré, à la porosité amplifiée.

On retiendra donc la catégorie de « **semi-perméable** », qui correspond à la valeur haute de 10^{-6} m/s (valeur la plus haute des deux fourchettes ci-dessus)

Perméabilité à l'eau		
Gamme	**Appréciation quantitative Ks (m/s)**	**Appréciation qualitative**
0	$10^{-2} \leq Ks < 10^{-4}$	Perméable
1	$10^{-4} \leq Ks < 10^{-7}$	Semi perméable
2	$10^{-7} \leq Ks < 10^{-10}$	Imperméable
3	$Ks \geq 10^{-10}$	Très imperméable

Structure (agrégation)

Le sol est un système structuré. La matière organique ou les argiles contenues dans un sol sont essentiellement responsables de sa structuration en **agrégats.**

Un sol sableux ne sera que faiblement agrégé. Ce paramètre dépend donc largement de la granulométrie du sol (composition du sol en limons, argiles et sables), et de la quantité de matière organique qu'il renferme. ➔Complexes argilo-humiques.

Structure	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible

2	Moyenne
3	Bonne

[Source : Support d'enseignement AgroParisTech ; Le devenir de l'eau dans le sol ; C. Chenu, 2008]

Granulométrie

La composition granulométrique d'un sol est très variable. On distingue différentes classes de taille d'éléments :

Argiles	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers	Graviers
<2 µm	Entre 2 et 20 µm	Entre 20 et 50 µm	Entre 50 et 200 µm	Entre 200 et 2000 µm	>2000 µm

Ainsi, la granulométrie des terres excavées dépendra directement de la composition du sol d'origine. Il est impossible de fournir une valeur type qui caractériserait le matériau « terres excavées ».

Tous les indices de la gamme de granulométrie sont donc concernés.

[Source : Support d'enseignement AgroParisTech ; Le devenir de l'eau dans le sol ; C. Chenu, 2008]

Granulométrie		
Gamme	**Appréciation quantitative Taille de particules**	**Appréciation qualitative**
0	T < 2 µm	Argileux
1	2 ≤ T < 50 µm	Limoneux
2	50 ≤ T < 2 mm	Sableux
3	T ≥ 2 mm	Grossier

Caractéristiques agronomiques des matériaux

pH

Le **pH des sols urbains est basique** (compris entre 7 et 8, parfois 9) du fait du lavage des façades des édifices, riches en carbonates, par les eaux de pluies, de la faible teneur en matière organique et du faible niveau d'éléments nutritifs. Les terres excavées issues du milieu urbain sont donc susceptibles de posséder cette caractéristique chimique.

[Source : Sous les pavés, la terre, connaître et gérer les sols urbains ; C. Cheverry, C. Gascuel ; Omniscience, 2009.]

Peu d'études permettent d'obtenir une caractérisation chimique des sols urbains. Une publication scientifique confirme cependant l'information citée ci-dessus : Métaux lourds dans les sols urbains en Russie, M. Lychagin, Faculty of Geography, Moscow State University, Vorob'evy gory, Moscow, Russia

pH		
Gamme	**Appréciation quantitative Valeurs de pH**	**Appréciation qualitative**
0	pH < 5	Acide
1	5 ≤ pH < 6,5	Acide/neutre
2	6,5 ≤ pH < 7,5	Neutre
3	pH ≥ 7,5	Basique

$CaCO_3$ total

Pour les raisons évoquées dans le paragraphe ci-dessus, **le sol urbain est enrichi en CaCO3** par rapport à un sol agronomique moyen. Aucune valeur n'a cependant pu être trouvée.

Notons que la composition chimique des sols est un paramètre fortement variable, et dépend d'une géologie nuancée à un niveau très local.

Carbonatation		
Gamme	**Appréciation quantitative Pourcentage de $CaCO_3$**	**Appréciation qualitative**
0	0%	Absente
1	0≤ $CaCO_3$ < 1 %	Faible
2	1 ≤ $CaCO_3$< 10 %	Moyenne
3	$CaCO_3$ ≥ 10 %	Importante

N total

Aucune donnée bibliographique spécifique aux sols urbains n'a été retrouvée. La teneur en N total va dépendre du type de sol.

Carbone organique

La teneur en carbone organique d'un sol est variable selon le type de sol considéré, ainsi que l'horizon dont il est question au sein même du profil.

Un rapport de la FAO fournit la teneur moyenne en carbone organique pour quelques types de sols (classification FAO-UNESCO et WRB, d'après Batjes 1996) :

Unité des sols		Teneur moyenne en C organique : kg/m²		
FAO-UNESCO	**WRB**	**0-30 cm**	**0-100 cm**	**0-200 cm**
Podzols	*Podzols*	13,6	24,2	59,1
Rendzinas	*Leptosols*	13,3	-	-
Lithosols		3,6	-	-
Chernozems	*Chernozems*	6,0	12,5	19,6
Nitrosols	*Nitrosols*	4,1	8,4	11,3
Xerosols	*Calcisols/Cambisols*	2,0	4,8	8,7
Yermosols	*Calcisols/Gypsisols*	1,3	3,0	6,6
Ferralsols	*Ferralsols*	5,7	10,7	16,9
Vertisols	*Vertisols*	4,5	11,1	19,1
Andosols	*Andosols*	11,4	25,4	31,0

[Source: Rapport FAO : http://www.fao.org/DOCREP/005/Y2779F/y2779f04.htm]

La valeur retenue pour ce paramètre dépendra donc du lieu et de la profondeur de l'excavation.

CEC

La CEC est très variable, et dépend de la composition du sol. La présence plus ou moins marquée de complexes argilo-humiques aura une influence notable sur sa valeur.
Le tableau ci-dessous présente les valeurs de la CEC associées à différents constituants du sol (argiles, substances humiques), ainsi que la CEC de certains types de sols :

Constituants	CEC en cmolc/kg	Sols (d'après Sposito, 1989)	CEC en cmolc/kg
Kaolinite	5-10	*Cambisols*	15
Illites	20-40	*Mollisols*	22
Smectites	80-120	*Oxisols*	5
Vermiculites	150-200	*Podzols*	11
Substances humiques	150-300	*Vertisols*	37

[Source : Support d'enseignement AgroParisTech ; Le devenir de l'eau dans le sol ; C. Chenu, 2008]

Ici encore, il s'agira d'identifier le type de sol qui a été excavé avant de pouvoir donner une valeur de la CEC.

P assimilable

Le phosphore du sol se distribue entre différentes formes selon le pH du sol (en solution dans la phase liquide du sol, adsorbé…).

Un site regroupant des professionnels de la canne à sucre fournit des valeurs pour les concentrations du P assimilable dans des sols plus ou moins riches en cet élément:

- Pour un sol très riche, on peut s'attendre à une concentration en P. assimilable du sol supérieure à 500 ppm (et une concentration en P total supérieure à 3000 ppm).

- Pour un sol moyennement pourvu en P : la concentration en P assimilable sera comprise entre 100 et 500 ppm (**soit entre 0,1 et 0,5 g de P par kg de sol**).
- Pour un sol pauvre en phosphore, la concentration en P. assimilable sera inférieure à 100 ppm (soit à 0,1 g de P par Kg de sol) (et la concentration en P total inférieure à 1000 ppm).

[Source : http://www.canne-progres.com/fertilisation/fertil_phosphore.php]

Une guide de l'Ademe stipule qu'en l'absence de fertilisation phosphatée, la roche mère est l'unique source de phosphore pour le sol. La concentration de phosphore dans les sols varie de 0,02% à 0,5% de P avec une **moyenne de 0,05% (soit 0,5 g de P par kg de sol).** Les variations résultent d'une différence de composition de roches mères et de l'intensité de l'altération.
Le sol est dit « de teneur de Phosphore élevée » pour une valeur supérieure à 0,2% en P.
[Source : La valeur phosphatée des boues résiduaires des stations d'épuration urbaines (guide ADEME, INRA, ENSAIA) connaître pour agir, guides et cahiers techniques, 1996]

On retiendra donc, au vu des informations collectées, qu'un sol moyen semble doté d'une concentration en P assimilable relativement élevée.

P assimilable		
Gamme	**Appréciation quantitative P assimilable (g/kg) préciser méthode d'extraction**	**Appréciation qualitative de la fertilité phosphatée**
0	P < 0,04	Très faible
1	0,04 ≤ P < 0,08	Médiocre
2	0,08 ≤ P < 0,12	Normale/correcte
3	P ≥ 0,12	Elevée

Caractéristiques de dangerosité des matériaux

pH sur éluat

Aucune valeur de ce paramètre n'a pu être trouvée.

Il est fréquent que des mesures chimiques sur éluats de terres excavées aient lieu (ces mesures permettent notamment de déterminer dans quel type de centre technique les terres peuvent être envoyées), mais elles ont alors lieu à pH fixé (par exemple pour les mesures de carbone organique).

[Source : Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes]

Teneur ou concentration totale en polluants

Les sols urbains sont susceptibles d'abriter une grande variété de polluants tels que **des métaux lourds, des hydrocarbures ou autres polluants**, présents suite à une activité industrielle ou commerçante (atelier de peinture de voitures, station essence, usines manipulant des produits chimiques..).

Ainsi, en ville, les polluants potentiels sont nombreux. Il est cependant impossible de prévoir une quantification ou une typologie des contaminants concernés. Cette caractérisation ne peut être établie qu'au cas par cas.

On retiendra ici la catégorie « contamination possible ».

Teneur/Concentration totale des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	En trace
2	Contamination possible
3	Contamination fréquente

Disponibilité des polluants

Comme vu précédemment, il existe une grande variété de polluants potentiels, dont il est difficile de donner une caractérisation générale.

Les métaux lourds seront plus ou moins disponibles en fonction du pH du sol, qui conditionne l'état ionique sous lequel ils se trouvent (leur spéciation).

Les hydrocarbures sont susceptibles d'être décomposés partiellement par les microorganismes du sol. Une partie volatile rejoindra l'atmosphère, tandis que les phases restantes resteront dans le sol, et seront potentiellement disponibles.

Notons toutefois que ces composés sont la plupart du temps hydrophobes et ne sont donc pas directement localisés dans la solution du sol.

Disponibilité des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	Très faible/négligeable
2	Possible en différé
3	Possible en immédiat

Bibliographie

Ouvrages et documents publiés :

- Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes
- L'analyse du sol minéralogique, organique et minérale, M. Pansu, J. Gautheyrou, éditions Springer, 2003.
- Etudes et prospections pédologiques en vue de l'irrigation, Bulletin pédagogique de la FAO 42, FAO 1990
- La valeur phosphatée des boues résiduaires des stations d'épuration urbaines (guide ADEME, INRA, ENSAIA) connaître pour agir, guides et cahiers techniques, 1996
- Métaux lourds dans les sols urbains en Russie, M. Lychagin, Faculty of Geography, Moscow State University, Vorob'evy gory, Moscow, Russia
- Sous les pavés, la terre, connaître et gérer les sols urbains ; C. Cheverry, C. Gascuel ; Omniscience, 2009

Liens internet :

- Informations issues d'études de la FAO:
  - ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f09.htm
  - http://www.fao.org/DOCREP/005/Y2779F/y2779f04.htm
- Site de professionnels des cannes à sucre : http://www.canne-progres.com/fertilisation/fertil_phosphore.php

Présentations académiques et supports de cours :

- Support d'enseignement AgroParisTech ; Le devenir de l'eau dans le sol ; C. Chenu, 2008
- Caractéristiques physiques des couvertures pédologiques, B. Jabiol, Présentation FIF-ENGREF, 2003

Boues de dragage : 17-05-06

17-05-06	boues de dragage autres que celles visées à la rubrique 17 05 05	Terres (y compris déblais provenant de sites contaminés), cailloux et boues de dragage :	Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)

Les boues de dragage peuvent être des boues de bassins de rétention d'eau pluviale, des fossés, des canaux, des cours d'eau et des retenues. Les boues de dragage maritime sont aussi étudiées.

Caractéristiques physiques des matériaux

Portance

Les boues de dragage sont un matériau complexe, comportant une phase plus ou moins élevée liquide et de nombreuses particules fines. Nous n'avons pas trouvé de documents concernant la « portance » en tant que telle des boues de curage, mais certains documents évaluent sa capacité de compaction sous poids propre (LCPC) ou un « indice portant immédiat » (Foucher, 2005). Dans les deux cas, les études indiquent que la portance est très faible.

Etude de la portance (LCPC) :

Les essais réalisés utilisent des modèles réduits auxquels on applique de fortes gravités pendant quelques heures, en faisant des essais en centrifugeuse. Le suivi du tassement est mesuré au fur et à mesure de la consolidation, et des lois de similitude permettent de transposer les résultats du modèle réduit à des résultats sur site. Trois types de matériaux ont été étudiés **: un sédiment tamisé à 5 mm et les fractions fine et grenue de ce même sédiment**. Les essais en macro gravité simulant la consolidation sous poids propre de sédiments de dragage ont été réalisés avec la centrifugeuse du LCPC Nantes. Les essais ont été menés pour 2 valeurs d'accélération de la pesanteur : 50 g et 70 g. Les valeurs déterminées varient de 3 à 6 % ce qui correspond à la précision de la mesure ; les deux gravités semblent donc peu influentes sur la consolidation des matériaux étudiés. Ces résultats concordent avec ceux de Balay et al. (1988).

Les résultats mettent en évidence la complexité de ces matériaux, la consolidation des échantillons brut et fin est très lente, même en condition drainée.

Les valeurs de résistance mécanique mesurées dans les éprouvettes après essais sont faibles. Les tassements mesurés ou calculés en fin de consolidation sont très différents selon les matériaux. L'épaisseur de la couche est réduite de 25 % pour l'échantillon grenu, de 43 % pour l'échantillon brut et de 70 % pour l'échantillon fin. Après 525 jours simulés, la consolidation de l'échantillon grenu est terminée alors que les échantillons brut et fin ont des degrés de consolidation de 0,8 et 0,7, respectivement. Pour ces derniers, la consolidation devient de plus en plus lente ; après une simulation de 400 jours supplémentaires à 70 g, les degrés de consolidation n'augmentent que de 10 à 15 %.

Ces essais, réalisés en laboratoire doivent être validés, par des essais sur pilotes (LCPC).

L'étude concernant le dragage maritime s'intéresse à l'Indice Portant Immédiat :

L'Indice Portant Immédiat d'un sable caractérise son aptitude à être porté à une densité élevée (compactabilité) et à ne pas se déformer sous le trafic de chantier. Un compactage aisé et une traficabilité correcte dans les conditions normales de sollicitation seront obtenus avec un indice portant immédiat (IPI) compris entre 40 et 60.

Comme le laissait prévoir la granulométrie non étalée du sable, après détermination des caractéristiques de compactage à l'énergie Proctor modifié du sable de dragage seul, il apparaît une insuffisance notable de ce matériau en densité sèche d'une part et en Indice Portant Immédiat d'autre part :

- Densité sèche (γd) : 1,63 à l'optimum (15 % d'eau) ;
- IPI maximal : 3, et sur une faible plage de teneur en eau (sensibilité à ce paramètre).

Il est donc nécessaire de faire appel à des matériaux correcteurs pour améliorer la portance du sable (Foucher, 2005).

Conclusion :

La forte humidité des boues et leur manque de cohésion induit une portance faible.

Portance	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Forte

Les deux données obtenues sont concordantes sur la faible portance des boues de dragage.

Conductivité des lixiviats

Pas de donnée obtenue en ce qui concerne la conductivité des lixiviats.

Densité apparente

L'étude Capilla et al. (2006) présente dix sites de dépôts de sédiments dragués ainsi que de nombreuses caractéristiques des sols de ces dépôts. En ce qui concerne la densité apparente, des volumes de 28 m^3 ont été échantillonnés sur chaque site et pesés après 48 heures à 105°C.

Site étudié	Densité apparente (sans unité)	Ecart-type moyen
A	1,17	0,06
B	0,73	0,06
C	0,65	0,07
D	0,67	0,15
E	0,65	0,07
F	0,73	0,12
G	0,93	0,12
H	0,9	0,01
I	1,1	0,28
J	0,45	0,21
Moyenne	0,798	
Ecart-type	0,22309938	
Minimum	0,45	

L'étude concernant le dragage maritime (Foucher, 2005) présente l'exemple du port autonome de Dunkerque dont les sables de dragage ont été étudiés : **la masse volumique apparente mesurée est de 1,41 g/cm^3**. Cette valeur est mesurée sur les sables de dragage ce qui peut expliquer la différence avec la valeur indiquée précédemment (Capilla & al., 2006).

Conclusion :

La densité apparente varie donc e 0,8 à 1,4. Des mesures complémentaires seraient souhaitables afin de confirmer la valeur de densité apparente évaluée.

Perméabilité à l'eau

Pas de données concernant la perméabilité.

Structure (agrégation)

Pas de données concernant la structure.

Granulométrie

Selon les études, la granulométrie des boues de dragage varie entre limoneuse et sableuse.

L'étude des sédiments fluviaux donne une granulométrie à tendance limoneuse (INERIS, 2010). Les résultats sont issus de l'analyse 1 138 échantillons de sédiments fluviaux, les chiffres donnés ci-dessous correspondent à la moyenne :

Composant	Classe	Moyenne	Ecart-type
Argile	0 < o < 2µm	14,4 %	10,2
Limons	2 < o < 50/63µm	47,4 %	24,3
Sables	50/63 < o < 2000µm	38,2 %	27,8

L'étude fait remarquer que la distribution granulométrique est très variable, avec des échantillons de type très argileux au type totalement sableux.

L'étude sur la valorisation des boues de dragage maritime (Brakni & al., 2007) confirme cette granulométrie :

Caractéristique	Valeur pour le sédiment étudié
Teneur en fine: < 63 µm (%)	100
Argile : < 2µm (%)	12.5
Limon : 2 a 63µm (%)	87.5

La distribution granulométrique révèle une **texture limoneuse** du matériau avec une proportion de particules argileuses de l'ordre de 12.5 %. Le calcul des coefficients d'uniformité Cu = 5.9 (Cu > 2) et de courbure Cc = 1.3 (1 < Cc < 3) révèle une **granulométrie étalée du sédiment**.

L'étude des boues de dragage du port autonome de Dunkerque (Foucher J., 2005) indique une texture plutôt sableuse :

Avec 2 % d'éléments inférieurs à 0,08 mm **et 90 % d'éléments inférieurs à 0,5 mm**, ce sable peut être classé d'un point de vue granulaire comme un sable moyen. Sa faible valeur au bleu de méthylène permet de confirmer le caractère propre du sable.

La granulométrie est très concentrée : près de 90 % des grains ont un diamètre compris entre 0,1 mm et 0,5 mm.

Conclusion :
Selon les types de boues étudiées, on peut penser que la granulométrie variera entre limoneuse et sableuse.

Granulométrie		
Gamme	**Appréciation quantitative Taille de particules**	**Appréciation qualitative**
0	T < 2 µm	Argileux
1	2 ≤ T < 50 µm	Limoneux
2	50 ≤ T < 2 mm	Sableux
3	T ≥ 2 mm	Grossier

Il serait intéressant d'approfondir les recherches afin de déterminer si la granulométrie des boues est directement liée à leur origine (curage fluvial, dragage maritime, etc.).

Caractéristiques agronomiques des matériaux

pH

Les différentes valeurs de pH répertoriées dans la littérature sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Valeur pH	**Source**	
8,3	Sol A	Capilla & al., 2006
7,9	Sol B	
7	Sol C	
9	Sol D	
7,2	Sol E	
7,8	Sol F	
8,2	Sol G	
8,8	Sol H	
8,1	Sol I	
7,4	Sol J	
7,6	LCPC	
7,69	Brakni & al., 2007	
Moyenne	182,45	
Max	9	
Min	7,2	
Ecart-type	0,60	

Pour l'étude sur les sites de dépôt de boues de curage (Capilla & al., 2006), la valeur du pH a été déterminée selon la norme NF ISO 10390 : les échantillons issus de l'horizon superficiel du sol ont été séchés à l'air et tamisés à 2 mm.

Conclusion :
Les données sont majoritairement issues de l'étude Capilla & al. De plus, ce sont celles dont la méthode d'obtention des données est précisée. Cependant, les deux autres valeurs semblent cohérentes et peuvent être intégrées dans un premier temps à la valeur finale choisie. La valeur moyenne obtenue peut-être une approximation du pH des boues de dragage.

pH		
Gamme	**Appréciation quantitative Valeurs de pH**	**Appréciation qualitative**
0	pH < 5	Acide
1	5 ≤ pH < 6,5	Acide/neutre
2	6,5 ≤ pH < 7,5	Neutre
3	pH ≥ 7,5	Basique

$CaCO_3$ total

Le guide « Plan wallon des déchets 2010 » (DRGNE, 2010) présente différentes catégories de déchets afin de réduire leur production et valoriser le recyclage. Les chiffres présentés ci-dessous sont issus de la section 16 « matières enlevées des cours d'eau et boues d'avaloirs ». Les données sont établies à partir d'une première évaluation de la teneur des sédiments des voies navigable sur la base des informations disponibles au 31 décembre 1996.

$CaCO_3$ en % de MS	
Moyenne	5,37
Minimum	0,04
Maximum	24,89
Ecart-type	4,3

Dans l'étude LCPC sur les sables de dragages, la proportion de $CaCO_3$ est estimée à 15 à 20 % selon les fractions.

Conclusion :

L'étude LCPC ne prend en compte que les sables, ce qui peut fausser les données. Dans un premier temps, il est donc plus judicieux de choisir la valeur moyenne établie par le guide « plan wallon des déchets 2010 », bien que les données soient anciennes et géographiquement ciblées sur la Belgique. Il serait donc utile de recueillir plus de données pour affiner la valeur choisie (5,37 % de MS).

Carbonatation		
Gamme	**Appréciation quantitative Pourcentage de $CaCO_3$**	**Appréciation qualitative**
0	0%	Absente
1	0≤ $CaCO_3$ < 1 %	Faible
2	1 ≤ $CaCO_3$< 10 %	Moyenne
3	$CaCO_3$ ≥ 10 %	Importante

Le nombre d'échantillons retenus pour obtenir la valeur moyenne n'est pas communiqué : une seule source est ici utilisée.

N total

Capilla et al. (2006) fournissent des données relatives à l'azote total dans les boues de dragage :

General characteristics and total metal contents of sediments

Site	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
N (g kg^{-1})	1.34	1.54	2.07	3.91	6.82	2.7	2.74	0.22	1.01	4.01

Conclusion :

La teneur moyenne en N total sur la base de cette étude est de **2,6 g/kg, soit 0,26 %**.

Carbone organique

Trois sources présentent des valeurs de calcul de carbone organique :

Source	**Valeur (% de MS)**	**Méthode d'obtention**	**Informations complémentaires**
Brakni & al., 2007	2,9	Non précisé	
DRGNE, 2010	5,17 (moyenne)	Les informations sont une première évaluation de la teneur des sédiments des voies navigables sur la base des informations disponibles au 31 décembre 1996	Minimum : 0,04 Maximum : 18,41 Ecart-type : 3,63
Mancioppi & al., 2010	3,4 (médiane)	Donnée issue de l'exploitation de 3 142 données (Agences de l'eau, Voies navigables de France, Service Public de Wallonie)	Min < 0,5 Max= 30 %

Conclusion :

Les données concernant le carbone organique total sont assez variées. Cependant, une **fourchette de 5 à 10 % de la matière sèche** pourrait être une première approximation de la teneur des boues de dragage en carbone organique total.

CEC

Capilla et al. (2006) fournissent des données relatives à la CEC des boues de dragage :

General characteristics and total metal contents of sediments

Site	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
CEC	16.4	16.6	13.8	19.4	23.6	16.6	23.1	2.6	16.3	20.9

Conclusion :

La teneur moyenne en N total sur la base de cette étude est de **17 cmol+/kg.**

P assimilable

Guide wallonie :

Phosphore (P_2O_5 en % MS) : Min=0,147
Max=2,02
Moyenne=0,61
Ecart-type=0,31

P assimilable	Source	
0,108	Sol A	Capilla & al., 2006 (g. kg^{-1}, méthode Olsen)
0,286	Sol B	
0,155	Sol C	
0,311	Sol D	
0,479	Sol E	
0,228	Sol F	
0,090	Sol G	
0,029	Sol H	
0,013	Sol I	
0,491	Sol J	
Moyenne	0,219	
Minimum	0,013	
Maximum	0,479	
Ecart-type	0,172	

P assimilable		
Gamme	**Appréciation quantitative P assimilable (g/kg) préciser méthode d'extraction**	**Appréciation qualitative de la fertilité phosphatée**
0	P < 0,04	Très faible
1	0,04 ≤ P < 0,08	Médiocre
2	0,08 ≤ P < 0,12	Normale/correcte
3	P ≥ 0,12	Elevée

Caractéristiques de dangerosité des matériaux

pH sur éluat

Pas de données concernant le pH sur éluat.

Teneur ou concentration totale en polluants

Les boues de dragages sont très étudiées étant donné leur teneur élevée en polluants. Les données sont très variables selon les sources :

LCPC, Produit boues de curage :

On trouve dans la littérature un certain nombre de données relatives aux teneurs en métaux lourds dans les boues de curage. Le tableau II présente les valeurs tirées de la littérature, pour des boues de bassins de décantation routiers et urbains et des vases de canaux. Il n'existe pas de norme spécifique pour ces matériaux, on compare habituellement les valeurs à la norme hollandaise pour les sols pollués ou aux teneurs limites dans les sols fixées en France pour les épandages de boues sur les sols agricoles (arrêté du 8 janvier 1998).

Référence	Cd mg kg^{-1}	Cr mg kg^{-1}	Cu mg kg^{-1}	Ni mg kg^{-1}	Pb mg kg^{-1}	Zn mg kg^{-1}	HCT Mg kg^{-1}
Lee *et al.* (1997)	4	-	-	-	55	130	-
Legret *et al.* (1995)	1-4	39-80	84-208	20-30	300-819	683-1980	-
Yousef *et al.* (1990)	2-28	19-68	4-73	7-29	30-1025	22-538	-
Jacopin *et al.* (1998)	0,2-1,8	-	15-118	-	47-250	45-630	-
ASFA (1993)	0,5-3,9	4-318	2-372	5-156	13-1417	27-4900	1-15087
Nightingale (1987)	-	-	24-39	22-40	130-1400	-	-
Marot (1998)	1	30	15	-	40	100	-
Norme hollandaise [1]	0,8	100	36	35	85	140	-
Norme hollandaise [2]	12	380	190	210	530	720	-
Norme française	2	150	100	50	100	300	-

Teneurs en métaux lourds dans des boues de bassins de décantation routiers et urbains - Comparaison avec les normes françaises et hollandaises pour les sols pollués.
1 : valeur cible, 2 : valeur d'intervention, HCT : hydrocarbures totaux

Plusieurs facteurs, liés au contexte, peuvent expliquer cette variabilité en particulier :

- la densité du trafic ;
- la configuration du bassin versant alimentant le bassin, notamment sa nature géologique ;
- le climat ;
- la conception du bassin.

D'une manière générale, les concentrations en Ni et Cr ne dépassent pas les valeurs cibles de la norme hollandaise pour les sols pollués; ces deux métaux ne sont pas typiques de la pollution routière et il est donc logique que leur concentration dans les boues de bassins de retenue d'eaux pluviales en milieu routier soit relativement faible. Les teneurs en Cd sont supérieures à la teneur limite dans les sols fixée en France pour les épandages de boues sur les sols agricoles, et à la valeur cible de la norme hollandaise pour les sols pollués. Les concentrations en Pb et Zn sont très élevées et dépassent fréquemment la norme d'intervention hollandaise.

Mancioppi & al., 2010 :

Parametres Seuil S1 (mg/kg)*	Métaux	Médiane	Moyenne
Arsenic	30	7,27	12,4
Cadmium	2	0,65	10,2
Chrome	150	36	52,1
Cuivre	100	21,7	48,5
Mercure	1	0,13	1,22
Nickel	50	19	26,8
Plomb	100	32,6	122
Zinc	300	130	446
Contaminants organiques			
HAP totaux	0.68	1,47	8,71
PCB totaux	22.8	0,057	0,2

*En mg/kg de sédiment sec analyse sur la fraction <2mm

Les données présentées ci-dessus sont issues de l'exploitation de plus de 10 000 données pour chaque catégorie (Agences de l'eau, Voies navigables de France, Service Public de Wallonie).

DGRNE, 2010 :

Composition des sédiments	Min	Max	Moyenne	Écart-Type
As (mg/kg MS)	1,41	1 005	25	92
Cd (mg/kg MS)	0,82	7 285	70	647
Cr (mg/kg MS)	6,8	750	77	75
Co (mg/kg MS)	4,6	994	26	87
Cu (mg/kg MS)	13	3 325	126	323
Hg (mg/kg MS)	0,010	10,3	0,87	1,36
Pb (mg/kg MS)	38	50 420	695	4 507
Zn (mg/kg MS)	78	134 800	2 236	12 090
Ni (mg/kg MS)	7,8	2 380	69	219
PCB totaux (mg/kg MS)	0,003	1,38	0,12	0,18

Ce tableau relève une forte variabilité des concentrations des éléments contenus dans les boues et démontre le besoin d'analyses systématiques des zones fractionnées de dragage ou de curage.

Le MET (laboratoire de Recherches Hydrauliques de Châtelet) estime qu'en moyenne, sur l'ensemble des produits de dragage, au moins 60% seront classés dans la catégorie B (boues contaminées) sur la base de l'arrêté du Gouvernement wallon du 30 novembre 1995.

Conclusion :

Teneur/Concentration totale des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	En trace
2	Contamination possible
3	Contamination fréquente

Les données sont assez variables d'une source à l'autre mais on peut considérer que la présence de polluants dans les boues de dragage est fréquente même si elle ne dépasse pas systématiquement les limites de contamination autorisées.

L'étude de l'INERIS est la plus récente et semble être la plus fiable. Cependant, les données devront être considérées avec précaution car elle ne concerne que les sédiments fluviaux ce qui fausse en partie les résultats.

Disponibilité des polluants

LCPC, Produit boues de curage :
Une étude récente relative à la toxicité des boues de bassins décanteur-deshuileurs en vue de leur épandage sur les emprises routières été réalisée au CETE de l'Est (Gigleux, 2000). Les résultats préliminaires ont montré que l'épandage de sédiments autoroutiers sur un talus présentait certains risques pour l'environnement et ne devait pas être réalisé sans précautions. La fraction mobilisable des polluants organiques et métalliques présents dans les sédiments est faible (moins de 5 % du pool initial) ; la migration des polluants vers les zones limitrophes et les exutoires (nappes, cours d'eau) semble donc limitée. Les polluants présents dans la matrice initiale restent majoritairement fixés dans celle-ci ou dans l'horizon superficiel de la terre végétale. Cependant, des essais de percolation ont montré que les eaux qui s'infiltrent au travers des boues présentent des concentrations en métaux sont relativement élevées dans les premières eaux. Les tests toxicologiques réalisés sur les percolats n'ont pas mis en évidence de toxicité aiguë de ces eaux.
Les essais sur plantes ont montré que les boues brutes sont toxiques pour certaines espèces. La combinaison des analyses chimiques et des essais toxicologiques constitue un moyen d'étude fiable pour l'évaluation du danger que représentent les boues.

Foucher, 2005 :
Le test de lixiviation est considéré actuellement comme un outil indispensable pour la prédiction du comportement des déchets. Ce test est réalisé car, une fois à terre, les sédiments ont le statut de déchet. Il consiste en la mise en contact de 100 grammes d'échantillon avec un litre d'eau pendant 3x16 heures à l'aide d'un agitateur à une vitesse de 60 oscillations par minute. C'est l'essai de lixiviation X31- 210 (AFNOR 1992).
Les résultats obtenus sont comparés aux valeurs limites, définies dans la circulaire «Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères» de 1994 (Tableau 10), en dessous desquelles les mâchefers peuvent être considérés comme valorisables en technique routière.

Éléments	mg/kg de matière sèche	Critères de valorisation d'un mâchefer
COT	140	<1 500 mg/kg
$SO4^{2-}$	<790	<10 000 mg/kg
Cr VI	<0,6	<1,5 mg/kg
As	<0,07	<2 mg/kg
Cd	<0,3	<1 mg/kg
Hg	<0,03	<0,2 mg/kg
Pb	<6	<10 mg/kg

Résultats de l'essai de lixiviation X31-210 (AFNOR 1992) sur le sable de dragage du Port Autonome de Dunkerque.

Mancioppi & al., 2010 :

Les résultats des essais de lixiviation transmis (567 échantillons, dont 560 pour VNF Bassin de la Seine) indiquent un taux de dépassement des seuils d'acceptation en Installation de Stockage pour Déchets Inertes (ISDI) situé entre <1 et 5% selon les paramètres, pour les sédiments testés. Au total, 12 % des échantillons ont au moins une concentration en métal lixiviable supérieure au seuil d'acceptation en ISDI. Au regard des critères d'appréciation retenus par le MEEDDM, les résultats des tests d'écotoxicité transmis (VNF Bassin de la Seine, 7 tests daphnies et 315 tests Brachionus) indiquent un taux de sédiments classé dangereux de 3,6 % des sédiments testés. Les lieux de prélèvement sont majoritairement échantillonnés une seule année, et ne constituent donc pas des réseaux réguliers de surveillance.

Conclusion :

Disponibilité des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	Très faible/négligeable
2	Possible en différé
3	Possible en immédiat

Les documents présentés sont issus d'expériences ponctuelles dont il est difficile de tirer une conclusion générale. Il semblerait qu'une partie assez faible des échantillons présentent des polluants disponibles et dangereux pour le milieu (sources : Mancioppi & al., 2010, LCPC, Produit boues de curage).

Cependant, il serait très judicieux de compléter ces documents afin d'obtenir une fiabilité plus importante des conclusions.

Bibliographie

Brakni S., Abriak N. E., Grégoire P. et Zentar R., (2007), Valorisation de boues de dragage maritime en granulats artificiels en vue de stabiliser l'érosion littorale, 25e rencontres de l'AUGC, Bordeaux.

Capilla X. Schwartz C. Bedell J.-P., Sterckeman T., Perrodin Y. et Morel J.-L. (2006) Physicochemical and biological characterisation of different dredged sediment deposit sites in France, Environmental Pollution, vol. 143, pp. 106-116.

Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGRNE) (2010) Horizon 2010 Plan wallon des déchets, http://environnement.wallonie.be/rapports/owd/pwd/index.htm.

Foucher J. (2005) Valorisation des déblais sableux de dragage portuaire en France métropolitaine.

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Produit boues de curage.

Mancioppi L., Padox J-M. et Hennebert P. (2010) Qualité chimique des sédiments fluviaux en France, Synthèse des bases de données disponibles, INERIS.

Ballast de voie autre que celui visé à la rubrique 17-05-07. : 17-05-08

17 05 08	ballast de voie autre que celui visé à la rubrique 17 05 07.	Terres (y compris déblais provenant de sites contaminés), cailloux et boues de dragage :	Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)

Le ballast est le lit de pierres ou de graviers sur lequel repose une voie de chemin de fer. Son rôle est d'assurer (i) la transmission uniforme des charges appliquées sur les traverses jusqu'à la plate-forme, (ii) l'amortissement d'une part des vibrations en provenance du contact rail/roue, (iii) le nivellement de la voie par un entretien simplifié, (iv) le drainage de la voie.
Le ballast subit deux types d'usure :

- contamination par des matériaux parasites, par exemple de la terre. On procède à des désherbages, mais il est nécessaire de remplacer le ballast régulièrement ;
- tassement du ballast sous les traverses, ce qui provoque une déformation verticale de la voie. Il est alors nécessaire de réinjecter du ballast de faible granulométrie sous les traverses; ou bien de réaliser une opération d'entretien à l'aide d'une bourreuse.

Le ballast de la rubrique 17 05 08 correspond donc principalement au ballast usagé, issu du renouvellement des voies ferrées, ne contenant pas de substances dangereuses.

Cette rubrique peut également inclure, dans une moindre mesure, le ballast issu de la désaffection des anciennes voies.

Disponibilité

Importance du gisement (tonnage produit par an)

Le principal gisement de ballast usagé est issu du renouvellement des voies. Deux train-engins en activité en France fonctionnent toute l'année en réalisant chacun 8 à 9 chantiers par an, soit un total de 400 à 500 km de renouvellement de voie (SETRA, 2010), avec un rendement moyen de 900 à 1000 m par jour (SETRA, 2010 ; Infra-SNCF-RFF, non daté). En revanche, une autre source (Infra-SNCF-RFF, non daté) mentionne un renouvellement d'environ 4000 km de voie en 4 ans, entre 2008 et 2012. Lors de ce renouvellement, le ballast, qui s'est chargé en terre ou en sable au fil du temps, est remplacé par du ballast neuf ou épuré. La quantité totale de ballast mise en voie (neuf ou réutilisé) est estimée à 2 400 T/jour, soit 2 400 T/km, (SETRA, 2010) et 2 500 T/km (Infra-SNCF-RFF, non daté). Le ballast extrait est criblé, les éléments < 30 et > 70 mm sont éliminés et au final 15 % du ballast extrait est réutilisé directement sous la voie (SETRA, 2010). Selon une autre source, jusqu'à 30 % du ballast usagé peut être réutilisé directement sur le réseau classique (hors LGV) (Sujet de thèse 2011-2012 proposé par Y. Descantes, Ifsttar).
Sur cette base, on peut donc estimer la production annuelle de ballast usagé par l'activité de renouvellement des voies sous la forme d'un intervalle :

- Estimation minimaliste : 400 km de voie renouvelés par an, 70 % de 2 400 T de ballast/km récupérés : 672 000 T/an ;
- Estimation minimaliste : 1000 km de voie renouvelés par an, 85 % de 2 500 T de ballast/km récupérés : 2 125 000 T/an.

Sur la base d'autres données, le tonnage de ballast neuf utilisé pour remplacer le ballast usagé est estimé à 5 millions de tonnes par ans (Sujet de thèse 2011-2012 proposé par Y. Descantes, Ifsttar). Ainsi, il se pourrait que l'estimation proposée ci-dessus, établie sur la base de la dynamique de renouvellement des voies, sous-estime le gisement réel de ballast usagé sur le territoire français.
Par ailleurs, estimation des quantités produites au niveau régional : Dans le Lot-et-Garonne, la SNCF utilise pour l'entretien des voies ferrées de 3 à 5 000 tonnes de ballast par an en moyenne, avec des pointes de l'ordre de 15 000 tonnes lors des renouvellements (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009).
La génération de ces produits est en augmentation car le budget de RFF pour les campagnes d'entretien des voies est doublé pour les cinq années à venir (Information Jean Séché).

Remarque : Le ballast issu des désaffections des anciennes voies est revendu par la SNCF lors d'Appels d'offres à des entreprises routières. Le matériau est au préalable stocké sur des gares importantes à proximité des chantiers de dépose des voies. Les lots sont toujours importants (supérieur à 10 Ktonnes). La valorisation est d'autant plus aisée que ces stocks sont sur des secteurs consommateurs de matériaux et proches des utilisateurs dans de grandes villes. Cependant, la politique de désaffection des voies étant plus trop de mise, on assiste à une raréfaction de ce type de gisement (Information Jean Séché).

Variabilité de la production dans le temps

La variabilité dans le temps du gisement de ballast usagé dépend de la planification des chantiers de renouvellement des voies.

Répartition du gisement sur le territoire Français

La répartition du gisement de ballast usagé sur le territoire français dépend de la planification des chantiers de renouvellement des voies.

Existence de filières de valorisation et importance de ces filières

Le ballast non réutilisé directement sous la voie de chemin de fer en cours de renouvellement serait envoyé dans des centres de tri, où il subit des opérations à l'issue desquelles (Site internet du Port autonome de Strasbourg, dans Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009 ; article Libération, 2006 ; document de l'Ifstarr descriptif de sujet de thèse) :

- le ballast « propre » est envoyé vers des entreprises qui le valorisent dans les travaux publics, les travaux autoroutiers, etc. ;
- le ballast ayant des traces d'huile, d'hydrocarbures et/ou de métaux est quant à lui recyclé par des entreprises spécialisées dans le traitement de ce genre de déchet.

Aucune donnée quantitative n'a été trouvée dans la littérature.

Provenance urbaine du déchet

Non.

Cadre / Statut réglementaire

Dépendant de la composition et du comportement à la lixiviation du ballast.

Caractéristiques générales des matériaux

Composition

Le ballast est issu du concassage de roches dures telles que granite, diorite, rhyolite, quartzite, le gneiss, etc. (Hosseingholian et al., 2011 ; Gaudriot, non daté).
Granite :

- 80% de quartz, feldspaths alcalins et plagioclases + Minéraux secondaires : mica, amphibole, etc. (Foucault et Raoult, 2001)
- composition chimique moyenne : SiO_2 = 73-74 % ; Al_2O_3 = 13-14 % ; $Na_2O + K_2O$ =8-9% ; oxydes Fe, Mn, Ca = 2-3%. (Foucault et Raoult, 2001)

Diorite :

- Feldspaths plagioclases, amphiboles vertes (hornblende) et un peu de biotite.
- Ordre de grandeur : SiO_2 52–63%

Rhyolite :

- principalement : quartz, feldspath, amphibole et biotite. Equivalent volcanique du granite. (Foucault et Raoult, 2001)
- Ordre de grandeur : SiO_2 > 71 % ; $Na_2O + K_2O$ = variable, Fe et Mg = faible

Quartzite :

- Principalement de Quartz (SiO2). (Foucault et Raoult, 2001)

Gneiss :

- Lits riches en ferromagnésiens (mica et amphiboles) alternant avec des lits clairs de quartz, feldspaths. (Foucault et Raoult, 2001)
- Composition d'un exemple de gneiss du Finistère, à titre indicatif : SiO2 = 70%, Al2O3 = 15%, Fe2O3 = 4%, MgO = 2%, CaO = 2%, Na2O = 3 %, K2O = 3%

Il est aussi possible d'utiliser le laitier produit par les hauts-fourneaux, dont la composition est la suivante, pour constituer du ballast (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009) :

- Silicate d'aluminium, de calcium et de magnésium ;
- La chaux (CaO), la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et la magnésie (MgO) représentent 97 % des constituants du laitier ;
- Les autres phases sont des oxydes secondaires (FeO, MnO) et des composés sulfurés. Ils ne contiennent ni argile, ni matière organique.

Eléments	(%)
CaO	40 à 48
SiO_2	32 à 41
Al_2O_3	9 à 18
MgO	1 à 9
MnO	0,4 à 0,7
FeO	0,2 à 1
S	0,6 à 1,5

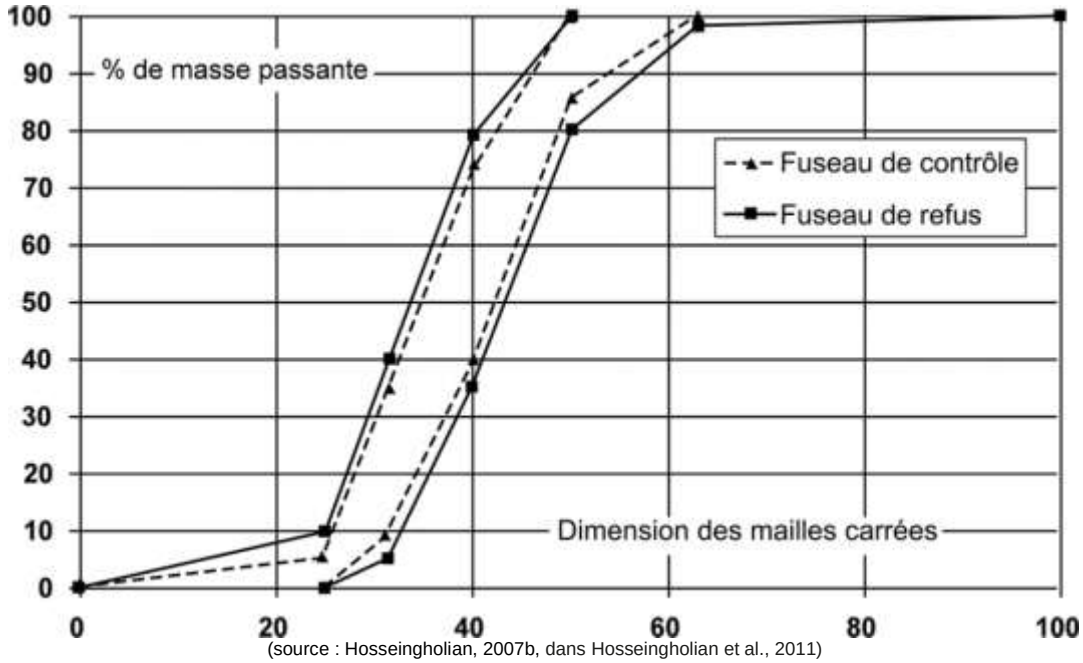
Composition chimique élémentaire du laitier de haut-fourneau (Alexandre et Sebileau, 1988, dans Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009)

Humidité/matière sèche, Fraction organique / Fraction minérale / Teneur en matière organique, Granulométrie/texture, Densité, Porosité, Couleur

Granulométrie :
Le ballast neuf est un granulat 25/50 mm provenant du concassage de roches extraites dans des carrières de roches dures (Hosseingholian et al., 2011 ; Al Shaer, non daté). En cohérence avec cette information, le Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest (Carrillo et al., 2009) indique :

Paramètre	Valeur min	Valeur max	Références
Granulométrie (mm)	25	50	MDDEP, 2002

Guérin et al. (1999) présentent le ballast comme un matériau dont la granulométrie s'étend de 20 à 60 mm.
Le ballast utilisé dans la voie doit avoir une courbe granulométrique à l'intérieur des fuseaux sur la courbe suivante. Les fuseaux de contrôle et de refus minimaux et maximaux déterminent la zone de tolérance qu'il ne vfaut pas dépasser (Hosseingholian et al., 2011 ; Al Shaer, non daté).



(source : Hosseingholian, 2007b, dans Hosseingholian et al., 2011)

Cependant, le fonctionnement de la voie ferrée et le passage successif des trains induisent une usure du ballast susceptible de modifier sa distribution granulométrique. Une augmentation de la proportion de fines résultant, soit de l'attrition et la fracture des grains, soit de la contamination le ballast par de la terre ou de la marne des terrains sous-jacents, se produit (Al-Qadi et al., 2008). Environ 70 à 76 % des matériaux fins qui « polluent » le ballast en colmatant ses vides résulteraient de la fracturation du ballast ; les remontées des couches sous-jacentes représenteraient environ 13 % des fines (Huang et Tutumluer, 2011 ; Al-Qati et al., 2008).

Lors des opérations de renouvellement des voies, le ballast extrait est criblé, la fraction comprise entre 30 et 70 mm est réinjectée sous la voie, tandis que les éléments < 30 et > 70 mm sont écartées et constituent le ballast usagé (SETRA, 2010).

Ainsi, la distribution granulométrique des ballasts usagés présentera nécessairement une distribution granulométrique très différentes des spécifications techniques du matériau neuf (cf. illustration ci-dessous).

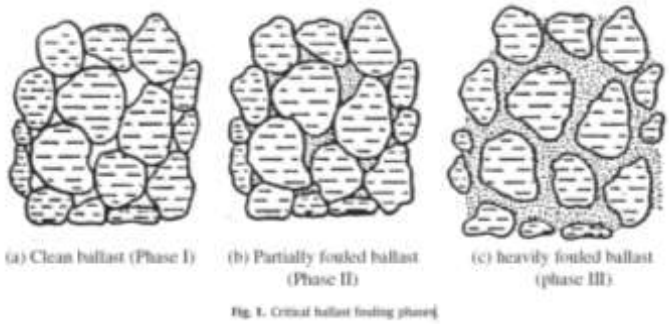


Illustration de l'évolution granulométrique et de la porosité avec l'usure du ballast (Huang et Tutumluer, 2011)

Densité :

La masse volumique du ballast neuf vaut environ 2800 kg/m^3 (Guérin et al., 1999). La modification de la granularité du ballast lors de l'usure est susceptible de modifier cette valeur. Aucune donnée n'est cependant disponible pour le ballast usagé.

Dans le cadre de la modélisation des vibrations du ballast, Zhai et al. (2004) retiennent comme hypothèse la valeur de 1,8.10+3 kg/m3 pour la densité du ballast.

Fraction organique / fraction minérale :

Aucune donnée quantitative n'est disponible. Le ballast usagé est un matériau très majoritairement minéral. Il est toutefois susceptible de présenter une part organique, liée à sa contamination par la terre sous-jacente et les excréments.

Il est globalement considéré que la teneur en matière organique des remblais des voies de chemin de fer est faible (Cederlund et al., 2007).

Porosité :

La proportion des vides, donc la porosité, du ballast usagé est également réduite par rapport à celle du ballast neuf estimée à 30 % (Al-Qadi et al., 2008).

Caractéristiques de dangerosité des matériaux (présence de substances, impacts)

Les substances suivantes, potentiellement dangereuses pour l'homme et environnement, sont susceptibles d'être présente dans le ballast. Il s'agit, par ordre décroissant d'importance des émissions :

- des métaux lourds, car des particules métalliques sont émises par frottement des roues sur la voie et le freinage. Ces métaux sont principalement du fer, suivi par du cuivre, zinc, manganèse, chrome, nickel, vanadium et plomb (Burkhardt et al., 2008). Les mêmes auteurs considèrent que seule une faible proportion de ces métaux est susceptible de passer en phase dissoute. Burkhardt et al. (2008) estiment les émissions de métaux du réseau ferré Suisse (7 200 km de voie) à 2270 T/an, soit 320 kg/km de voie/an.
- des hydrocarbures et notamment (Site internet du Port Autonome de Strasbourg) :
    - de la créosote, car les traverses en bois (quand elles ne sont pas remplacées par des traverses en béton) sont traitées afin de permettre une meilleure conservation et résistance aux intempéries. La créosote contient 200 à 10 000 substances différentes : 80-85% sont des hydrocarbures aromatiques polycycliques, 5-15% sont des hydrocrbures hétérocycliques, 1-12% sont des composés phénolés et 5 % des composés hétérocycliques variés. Une traverse en bois est susceptible de relaquer environ 5 kg de creosote pendant sa durée de vie (25 ans) (Burkhardt et al., 2008).
    - des graisses et huiles, car les appareils de voie (aiguillages) et les roues des trains font l'objet d'un graissage régulier.

  Burkhardt et al. (2008) estiment les émissions d'hydrocarbures du réseau ferré Suisse (7 200 km de voie) à 1357 T/an, soit environ 190 kg/km de voie/an. Selon Smith et al. (1981), les huiles extraites des voies ferrées seraient riches en fer, silicium, aluminium et étain.
- des produits phytosanitaires car de nombreux herbicides sont utilisés pour désherber les voies (site internet du port autonome de Strasbourg). Cederlund et al. (2007) se sont en particulier intéressés au devenir du diuron (3-(3,4-dichlorophényl)-1,1-diméthylurée) et du MCPA (acide 4-chloro-2-méthylphénoxyacétique). Le glyphosate est utilisé pour l'entretien du réseau ferroviaire suisse (Burkhardt et al., 2008). Burkhardt et al. (2008) estiment les émissions d'herbicides du réseau ferré Suisse (7 200 km de voie) à 3,9 T/an, soit 0,5 kg/km de voie/an.

D'autres éléments, moins dangereux que les précédents, sont également émis : calcium, carbone, magnésium, phosphore et soufre (Burkhardt et al., 2008).

Le document de l'Ifstarr (descriptif de sujet de thèse) mentionne également des problèmes de valorisation du ballast usagé en raison de la présence de métaux lourds et de créosote.
Aucune donnée de teneur de ces composés dans les ballasts n'a été retrouvée dans la bibliographie.

Caractéristiques strictement agronomiques des matériaux

Teneur en matière organique, pH teneur en azote et carbone, teneur en eau :
Smith et al. (1981) indiquent l'existence de populations de microorganismes variés dans le ballast des voies ferroviaires, représentées par des espèces de levures, bactéries et champignons filamenteux. Certains de ces organismes (*Pseudomonas*, *Rhodotorula* et *Cladosporium*) seraient capables de dégrader les huiles présentes dans les ballasts, cependant le manque d'azote dans le ballast serait un facteur limitant de leur prolifération.
Cederlund et al. (2007) ont travaillé sur les « remblais ferroviaires » suédois (il ne s'agit pas nécessairement uniquement de ballast) dont les caractéristiques (pH, teneur en eau, NH4+, NO3-, N total, K total et Mg) sont les suivantes :

Table 1
Soil characteristics of the three railway embankments studied

Soil/treatment	pH	Loss on ignition[a] (%)	NH_4^+ (mg kg^{-1})	NO_3^- (mg kg^{-1})	Total N (mg kg^{-1})	P[b] (mg kg^{-1})	K[b] (mg kg^{-1})	Mg[b] (mg kg^{-1})
Mora A	6.23	1.92	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Mora B	6.29	1.20	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Mora C	6.46	0.77	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Vetlanda A	5.78	1.25	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Vetlanda B	6.33	0.72	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Vetlanda C	6.30	0.51	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Varberg 0a	5.17	0.69	0.06	0.56	0.62	12.9	5.01	2.67
Varberg 0b	5.65	0.61	0.02	0.35	0.37	8.70	4.92	6.14
Varberg 0c	6.08	0.98	0.06	1.16	1.22	13.9	14.9	16.3
Varberg 0d	5.44	0.85	0.06	0.77	0.83	16.2	10.4	5.79
Varberg 1a	6.20	1.20	0.09	3.27	3.36	15.9	19.3	25.9
Varberg 1b	5.30	0.73	0.03	0.74	0.77	11.1	1.26	5.17
Varberg 1c	5.94	1.05	0.05	1.84	1.89	11.2	14.0	16.9
Varberg 1d	5.62	0.84	0.11	3.28	3.38	13.4	8.78	10.3
Varberg 2a	5.16	0.80	0.04	0.20	0.24	13.5	15.6	6.45
Varberg 2b	5.27	0.80	0.04	0.56	0.60	15.1	9.31	4.70
Varberg 2c	4.92	0.88	0.06	0.69	0.75	15.1	15.3	7.80
Varberg 2d	5.42	0.72	0.10	2.26	2.36	12.2	9.27	4.15

Varberg 0–2 refer to treatments 0 = previously untreated with MCPA; 1 = sprayed 1-year prior to sampling with a mixture of BASF MCPA 750 and Roundup Bio; and 2 = sprayed for two consecutive years prior to sampling with the same mixture. a–d refer to different plots of the same treatment.
[a]Loss on ignition was measured as the weight loss from dried soil (105 °C) after 5 h of incineration at 550 °C.
[b]P, K and Mg measured by extraction with ammonium lactate and acetate (Svensk Standard, 1993).

D'autres remblais superficiels de chemin de fer suédois présentent également des propriétés relativement proches (Cederlund et al., 2008) :

Table 2 – Some soil characteristics and microbial biomass and activity from the three sampling occasions

Location	Occasion	WC (%)	pH	LOI (%)	BR (μg CO_2-C g^{-1} h^{-1})	r (μg CO_2-C g^{-1} h^{-1})	SIR (μg CO_2-C g^{-1} h^{-1})	C_{mic} (μg g^{-1})
Vetlanda$_{topsoil}$	2002	2.9	6.3	0.64	0.040	0.005	0.16	12.5
Mora$_{topsoil}$	2002	4.5	6.5	1.02	0.051	0.016	0.29	22.8
Mora$_{topsoil}$	2003	12.4	6.2	0.97	0.19	0.034	0.32	25.6
Mora$_{subsoil}$	2003	3.4	5.7	0.75	0.039	0.010	0.14	10.0

The values presented are the median values of the topsoil samples taken from the centre of the tracks at Mora and Vetlanda (n = 47, 60, and 20). For the subsoil samples the median of all subsoil measurements are presented (n = 25).

La biomasse et l'activité microbienne dans les remblais ferroviaires (dont nous considérons que le ballast fait partie) est faible par rapport à celles des sols agricoles (Cederlund et al., 2008). Cette observation est mise en relation avec le fait que ces remblais constituent un substrat pauvre. Sont notamment mises en avant les teneurs en eau et en matière organique, comme freins à l'activité des microorganismes. Les auteurs soulignent également une distribution de l'activité microbienne hétérogène dans le remblai.
Forme des particules :
Le ballast est un matériau anguleux à arêtes vives, à grains aplatis, mais non effilés (Guérin et al., 1999). Cependant, les caractéristiques géométriques du ballast sont impactées par l'usure (document Ifsttar, sujet de thèse). Il est donc probable que le ballast usagé présente des angles plus émoussés que le ballast neuf.

Caractéristiques strictement mécaniques des matériaux

Le document de l'Ifstarr (descriptif de sujet de sujet de thèse) précise que, d'expérience, l'usure du ballast s'avère ne pas dégrader les caractéristiques mécanique du ballast, essentiellement la résistance au choc et la résistance à l'usure par attrition.
Les propriétés mécaniques du ballast usagé pourraient donc approcher celles du ballast neuf, lequel répond à des spécifications sur les deux paramètres suivants :

- Coefficient Los Angeles (LA) ;
- Coefficient Micro Deval en présence d'eau (MDE).

Paramètre	**Valeur min**	**Valeur max**	**Références**
Coefficient Los Angeles (LA)	dépendent du trafic et de la nature des traverses. (En général <= 55)		Al Shaer (non daté) et site internet OFRIR, dans Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest (Carrillo et al., 2009)
Coefficient Micro Deval en présence d'eau (MDE)	dépendent du trafic et de la nature des traverses. (Toujours >1)		

Ces valeurs n'ont pas été retrouvées dans d'autres sources.

Bibliographie :

Al-Qadi I. L., Xie W. et Roberts R. (2008) Scattering analysis of ground-penetrating radar data to quantify railroad ballast contamination, NDT & E International, Vol. 41-6, pp. 441-447
Al Shaer A. (non daté) Analyse des déformations permanentes des voies ferrées ballastées – approche dynamique. Thèse.
Burkhardt M., Rossi L., Boller M. (2008) Diffuse release of environmental hazards by railways, Desalination, Vol. 226-1-3, pp. 106-113.
Cederlund H., Börjesson E., Önneby K., Stenström J. (2007) Metabolic and cometabolic degradation of herbicides in the fine material of railway ballast, Soil Biology and Biochemistry, Vol. 39-2, pp. 473-484.
Cederlund H., Thierfelder T., Stenström J. (2008) Ecotox: Functional microbial diversity of the railway track bed, Science of The Total Environment, Vol. 397-1-3, pp. 205-214.
Descantes Y. (non daté) Sujet de thèse 2011-2012 proposé par l'Ifsttar http://media.lcpc.fr/ext/pdf/theses/propos-2011-2014/W3-contr-2011.pdf
Foucault A. et Raoult J-F. (2001) Dictionnaire de Géologie, Dunod, 5ème édition.
Gaudriot, Carrières de Condat SAS (non daté) Commune de Verneuil-sur-Vienne (87), Carrière de Pagnac, Demande d'autorisation de renouveler et d'étendre l'exploitation d'une carrière à ciel ouvert Poursuite de l'autorisation d'utiliser les installations de traitement des matériaux : présentation de la demande et dossier technique. Rapport référencé : CEN/TR/CONDA002/05/03/v2
Guérin N., Sab K. et Moucheront P. (1999) Identification expérimentale d'une loi de tassement du ballast, Can. Geotech. J., vol. 36, pp. 523–532.
Hosseingholian M., Levacher D. et Khay M. (2011) Mesure en continu de la raideur dynamique d'une voie ferrée, Rev. can. géotech., vol. 48, pp. 439–450.
Huang H. et Tutumluer E. (2011) Discrete Element Modeling for fouled railroad ballast, Construction and Building Materials,
Infra-SNCF-RFF (non daté) Renouvellement du réseau, Plaquette documentaire : http://www.rff.fr/IMG/Fiche-identite-modernisation-Lorraine.pdf.
Libération : 2006 : http://www.liberation.fr/economie/010949928-l-etat-redonne-de-la-voie
MDDEP Quabec (2002) Guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de sources industrielles comme matériau de constriction, Ministère de l'Environnement, Direction des politiques du secteur industriel, Service des matières résiduelles : http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/inorganique/matiere-residuelle-inorganique.pdf.
Port autonome de Strasbourg : http://www.strasbourg.port.fr/rubrique.php3?id_rubrique=144
SETRA (2010) Modernisation des infrastructures ferroviaires : opérations de renouvellement de voies ballast, de création de voies supplémentaires et d'électrification http://www.setra.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/1018w_Modernisation_des_infrastructures_ferroviaires.pdf
Smith A. D., Hughes R. K., Wood B. J. B. (1981) The microbiology of railway tracks in three urban locations, Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological, Vol. 26-3, pp. 193-201.
Zhai W. M., Wang K. Y., Lin J.H. (2004) Modeling and experiment of railway ballast vibrations, Journal of Sound and Vibration, vol. 270, pp. 673–683.

Matériaux de construction à base de gypse autres que ceux visés à la rubrique 17 08 01 issus de la construction et de la démolition : 17 08 02

17 08 02	matériaux de construction à base de gypse autres que ceux visés à la rubrique 17 08 01.	Matériaux de construction à base de gypse :	Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)

Cette rubrique est susceptible d'inclure :

- Des plaques et carreaux de plâtre résidus de la fabrication industrielle de ces matériaux ;
- Des déchets de plâtre produits par le BTP, lors des étapes de mise en œuvre et de fin de vie des matériaux.

Disponibilité

Importance du gisement (tonnage produit par an)

- **Plaques et carreaux de plâtre résidus de la production industrielle de ces matériaux :**

En ce qui concerne la fabrication, les déchets à base de gypse sont principalement des chutes de plaques de plâtre cartonnées et de carreaux de plâtre.
Selon le Syndicat de l'Industrie du Plâtre (01.44.01.47.74), ce déchet représente 35 000 T/an.
La production de l'industrie française du plâtre représentait 3 000 000 T de plâtre de construction en 2008, dont 690 000 ont été exportés (Site internet de la Société Chimique de France). L'essentiel de la production est assurée par 3 groupes : Lafarge Plâtres, Placoplâtre et Plâtres Knauff. Par ailleurs, en 1999, le taux de chutes moyen lors de la production de plaques de plâtre est estimé à 2,5 % (Syndicat National des Industries du Plâtre, 2003-a). Daligand (2002) indique que les déchets de fabrication représentent environ 5 % de la production. Sur la base de ces informations, considérant un taux de chute identique pour la fabrication de plaques et de carreaux de 2,5 à 5 %, une seconde estimation de l'ordre de 75 000 à 150 000 T/an peut être proposée.

- **Des déchets de plâtre produits par le BTP :**

En ce qui concerne la mise en œuvre, les déchets à base de gypse sont des chutes de plaques et de carreaux de plâtre. A cette étape, le taux de chutes moyen lors de la mise en œuvre de carreaux de plâtre est estimé à 5 % (Syndicat National des Industries du Plâtre, 2003-b).
On estime à 5 % en moyenne les déchets par rapport aux quantités mises en œuvre. En fait, ce taux peut varier de 2 % à plus de 10 % en fonction des découpes nécessitées par le bâtiment. En prenant les résultats de la quantification FNB/ADEME[10], les quantités de plâtre contenues dans les déchets de construction (neuve et réhabilitation) rapportées au tonnage de produits plâtre mis en œuvre annuellement, donnent un taux de 2,8 % (Daligand, 2002).
Cette catégorie inclut également les déchets de plâtre issus des chantiers de démolition, correspondant aux matériaux en fin de vie.
Sur la base des données relatives à l'année 2008, le secteur du BTP génère 1 844 000 T/an de déchets de plâtre (Commissariat général au développement durable).

Variabilité de la production dans le temps

A priori : pas de variation saisonnière.

[10] FNB : Fédération nationale du bâtiment, devenue Fédération française du bâtiment (FFB)

Répartition du gisement sur le territoire Français

- **Plaques et carreaux de plâtre résidus de la production industrielle de ces matériaux :**

17 usines de fabrication de plâtre existent en France. Elles sont réparties de manière relativement hétérogènes sur le territoire français, et présentent notamment une forte concentration en Ile-de-France, conséquence de la localisation de 70 % des carrières dans cette région (Site internet Les Industries du Plâtre).
Leurs implantations sont les suivantes (Site internet Les Industries du Plâtre) : Auneuil (60), Carpentras (84), Saint Loubès (33), Ottmarsheim (68), Pin (77), Mazan (84), Carresse (64), Pouillon (40), Mériel (95), Vaujours (93), Chambéry (73), Cognac (16), Cormeilles (95), Vaujours (93), Pouillon (40), Vandières (54) et Soupplets (77).

- **Des déchets de plâtre produits par le BTP :**

Etant issus de l'extension et du renouvellement urbain, les déchets de plâtre produits par le BTP sont répartis de manière homogène sur le territoire français.

Existence de filières de valorisation et importance de ces filières

- **Plaques et carreaux de plâtre résidus de la production industrielle de ces matériaux :**

Les sites de production de plaques et carreaux de plâtre réalisent un recyclage interne de ces chutes de plaques et carreaux (Syndicat National des Industries du Plâtre, 2003-a et b). Depuis 2000, la totalité des sites de production en France dispose d'un équipement de broyage et de recyclage des rebuts de production. Ainsi 100 % de ces déchets sont recyclés directement sur le site de production et intégrés dans le procédé de fabrication en substitution du gypse, ressource naturelle non renouvelable (Les industries du Plâtre, 2007). L'incorporation de chutes de production ne modifie pas la qualité du produit fini (Syndicat National des Industries du Plâtre, 2003-b).

- **Des déchets de plâtre produits par le BTP :**

En ce qui concerne les chutes de plaques et carreaux produits lors de la mise en œuvre sur les chantiers et les déchets de plâtre produits lors de la démolition d'ouvrages, actuellement, ces déchets sont majoritairement mis en décharge (Syndicat National des Industries du Plâtre, 2003-a et b ; Charte de Gestion des Déchets de Plâtre 30 janvier 2008).
En effet, les déchets de démolition sont généralement mélangés à d'autres produits (peinture, colles, revêtements, etc.) et ne peuvent pas être recyclés facilement. Le tri sélectif lors de la démolition permet éventuellement d'isoler des produits destinés au recyclage et des produits mis en centre de stockage (Daligand, 2002).
Selon le Commissariat général au développement durable, 98,3 % des déchets de plâtre issus du BTP transiteraient par les déchetteries.
En partenariat avec le Plan Construction et Architecture, les industriels du plâtre mettent en place des expérimentations de tri et de collecte sélective sur les chantiers (Les industries du Plâtre, 2007).
Une filière de collecte et de tri se monte progressivement mais de manière indépendante entre chacun des 3 industriels fabricants. Les déchets collectés et triés sont intégrés dans le procédé de fabrication des produits en plâtre en substitution du gypse, ressource naturelle non renouvelable (Site internet ADEME, A chaque déchet des solutions).
Le recyclage sur les sites de production pourrait s'étendre aux chutes de mise en œuvre et aux produits de démolition (Syndicat National des Industries du Plâtre, 2003-a et b ; Charte de Gestion des Déchets de Plâtre 30 janvier 2008). La Charte de Gestion des Déchets de Plâtre du 30 janvier 2008, signée par les 3 grands industriels producteurs du plâtre, se fixait comme objectif à l'horizon 2010 de « développer la filière recyclage en élargissant l'accès aux ateliers de recyclage déjà existants et en explorant de nouvelles voies de valorisation ». Ces actions portent sur les déchets à base de plâtre issus des chantiers de construction et de déconstruction sélective.
Aucune donnée sur le suivi de cet objectif n'a été retrouvée.
A delà de la mise en décharge et du recyclage dans la filière du plâtre, Daligand (2002) mentionne la valorisation des déchets à base de gypse issu du BTP en remblayage de carrières, en particulier des carrières souterraines de gypse. Il ouvre un débouché quasiment naturel puisqu'il consiste à stocker dans une cavité un matériau chimiquement identique à celui qui a été extrait.

Provenance urbaine du déchet

- **Plaques et carreaux de plâtre résidus de la production industrielle de ces matériaux :** non.
- **Des déchets de plâtre produits par le BTP :** oui.

Cadre / Statut réglementaire

Les déchets de plâtre ne sont pas des déchets inertes. Ils peuvent être valorisés ou éliminés dans des casiers spécifiques d'installations de stockage de déchets non dangereux (Site internet ADEME, A chaque déchet des solutions).

Caractéristiques générales des matériaux

Composition

Le plâtre est issu de la déshydratation partielle du gypse, le sulfate de calcium dihydraté (CaSO4, 2H2O), donnant à 150°C le semihydrate de calcium (CaSO4, 1/2H2O) et à 290°C de l'anhydrite (CaSO4) (Site internet de la Société Chimique de France).
Lors du procédé de fabrication, le gypse est criblé, homogénéisé, conduit dans un four, cuit à 150°C puis refroidi à 60°C. On obtient alors le semi-hydrate (http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=4731).
Le plâtre est ensuite mélangé dans un malaxeur avec différents ajouts (souvent quelques pour mille) (http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=4731) :

- De l'amidon, pour améliorer l'adhésion entre le plâtre et le carton ;
- Des adjuvants, ou des agents moussants (Syndicat National des Industries du Plâtre, 2003-b) ;
- Des agents modulant la vitesse de prise du plâtre :
    - Des accélérateurs, particulièrement utilisés dans l'élaboration de produits préfabriqués, permettent de diminuer le temps de prise. Le gypse finement broyé (provenant par exemple du recyclage de chutes de fabrication) permet d'apporter de nombreux germes de cristallisation. L'ajout d'ions sulfate permet également d'accélérer la prise.
    - Les principaux retardateurs de prise sont des phosphates alcalins, des acides organiques et leurs sels (par exemple l'acide citrique et les citrates).

Lors d'un ajout d'eau, l'hémihydrate (et l'anhydrite) se dissout, puis CaSO4, 2H2O (le gypse) précipite : c'est la prise du plâtre (Site internet de la Société Chimique de France).
Plâtre en poudre, ou plâtre de Paris : principalement constitué de sulfate de calcium hémihydrate (β) (CaSO4,1/2H2O, de 60 à 80 %) et d'anhydrite (CaSO4), les autres composés présents provenant d'impuretés contenues initialement dans le gypse. Un exemple de composition issu du Site internet de la Société Chimique de France est présenté ci-dessous.

Exemple de composition de plâtre en poudre destiné à la réalisation d'enduits	**Teneur**
CaSO4, 1/2H2O	72 %
CaSO4	18 %
CaCO3	7 %
MgCO3	1 %
Argile et silice	2 %
Adjuvants	< 1 %

Kuryatnyk et al. (2010) ont travaillé sur le comportement de plâtre de Paris, dont la composition élémentaire est la suivante :

Properties of plaster of Paris.

Chemical analysis								
Oxides	SiO_2	Al_2O_3	CaO	TiO_2	MgO	P_2O_5	SO_3	LOI
%	1.5	0.2	38.5	0.01	0.8	n.d.	49.6	9.3

Enduits divers : ils sont projetés mécaniquement ou appliqués manuellement sur les murs et plafonds sans addition d'un autre liant ou d'un granulat. La norme EN 13279-1 distingue trois grandes familles (Daligand, 2002) :

- les plâtres de construction comportant plus de 50 % en masse de sulfate de calcium actif et moins de 5 % en masse de chaux ;
- les enduits à base de plâtre comportant moins de 50 % en masse de sulfate de calcium actif et moins de 5 % en masse de chaux ;
- les enduits plâtre/chaux comportant moins de 50 % en masse de sulfate de calcium actif et plus de 5 % en masse de chaux.

Autres produits confectionnés sur chantier :

- Des mortiers à base de plâtre (sous forme d'anhydrite) et de sable sont utilisés pour réaliser des sols intérieurs de locaux (Site internet de la Société Chimique de France).
- Le stuc est un plâtre additionné d'ajouts chimiques (Chaux) et de poudre de pierre, il est destiné à réaliser des enduits en relief et en sculpture, effectuer des moulages et imiter le marbre (Site internet de la Société Chimique de France ; http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=4731).
- Le staff est un plâtre armé de fibres végétales, de fibres de verre ou d'autres matériaux, il est utilisé pour confectionner des plaques pour plafond et des éléments décoratifs (rosaces, corniches, moulures, colonnes, etc.) (Site internet de la Société Chimique de France ; http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=4731).

Carreau de plâtre : Principalement destinés à la réalisation de cloisons intérieures ou de doublage, ce sont des éléments rectangulaires moulés, d'épaisseur variant entre 4 et 10 cm, pleins ou alvéolés et résistants à l'eau si nécessaire (hydrofuges) (http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=4731). Généralement d'épaisseur comprise entre 5, 6 et 7 cm pour des dimensions de 66 x 50 cm (Site internet de la Société Chimique de France ; Daligand, 2002). Ces carreaux sont collés, au moyen d'une colle spéciale à base de plâtre. Il existe également des carreaux spéciaux : légers isolants, haute densité, résistants à l'humidité.
Plaques de plâtre : Ces plaques sont (Daligand, 2002 ; http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=4731 ; Site internet de la Société Chimique de France) :

- constituées de plâtre, moulées entre deux feuilles de carton constituant à la fois son parement et son armature ;
- généralement d'épaisseur comprise entre 9,5 et 15 mm, pour des dimensions de 1,2 x 2,5 m.
  Il existe également des plaques de largeur 0,90 m et 0,60 m. De plus, aux plaques standards d'épaisseur courante (9,5 mm, 12,5 mm, 15 mm) se sont ajoutées les plaques de forte épaisseur (18 à 25 mm) pour certains systèmes de cloisons et les plaques de faible épaisseur (6 mm) pour la réalisation de surfaces courbes ;
- utilisées pour la réalisation de cloisons et de plafonds ainsi que pour la finition des murs intérieurs (parement des isolants).

Humidité/matière sèche, Fraction organique / Fraction minérale / Teneur en matière organique, Granulométrie/texture, Densité, Porosité, Couleur

Les caractéristiques de teneur en matière sèche, de granulométrie, de densité, de porosité des granulats recyclés sont dépendantes des opérations de traitements citées au paragraphe 0.
Granulométrie et porosité :
Le plâtre de Paris (constitué de 60 à 80 % de sulfate de calcium hémihydrate (β) et d'anhydrite) présente une densité faible et une porosité élevée qui lui confère de bonnes propriétés d'isolation (Kuryatnyk et al., 2010). Le diamètre moyen des grains de plâtre de Paris sur lequel les auteurs ont travaillés est de 52 µm.
Kuryatnyk et al (2010) ont étudié le comportement d'un mortier constitué de 25 % de plâtre de Paris et de 75 % de sable, soumis à des essais d'extraction du type Soxhlet. L'essai est mené sur 5 jours, avec de l'eau à 90-100°C et 19 cycles sont réalisés par jour. La porosité et le diamètre des pores initiaux du mortier étaient de 29 % et 2,4 µm respectivement. A l'issue de l'essai, l'échantillon est déstructuré : sa porosité (mesurée au prosimètre à mercure) est de 55,1 % et le diamètre moyen des pores de 4,5 µm et on constate une augmentation de la proportion des macro-pores au détriment des micro- et méso-pores.

Densité :
La norme EN 12859 distingue trois classes de densité pour les carreaux de plâtre commercialisés (Daligand, 2002) :

- haute densité : $1\,100 < \rho < 1\,500$ kg/m^3 ;
- densité moyenne : $800 < \rho < 1\,100$ kg/m^3 ;
- basse densité : $600 < \rho < 800$ kg/m^3.

Teneur en eau :
Selon la norme NF EN 12859 de 2001[11], la teneur en eau moyenne des carreaux de plâtre ne doit pas dépasser 6 % et aucune valeur individuelle ne doit dépasser 8 %.

[11] Bien que faisant l'objet d'une révision sous la forme d'un document provisoire, cette norme fournit des ordres de grandeur des caractéristiques pour les carreaux de plâtre.

Caractéristiques de dangerosité des matériaux (présence de substances, impacts)

Teneurs en substances chimiques

Polychlorobiphényles (PCB) :
Autrefois, les PCB ont été utilisés dans des mélanges de PVA (polyvivnylacétate) pour améliorer les propriétés mécaniques (flexibilité, résistance à l'érosion mécanique des plâtres, meilleure adhérence à un grand nombre de matériaux) des plâtres dans les bâtiments. Afin d'évaluer l'existence ou non d'une problématique associée à cette ancienne pratique, 35 échantillons de plâtre ont été prélevés sur des bâtiments norvégiens et on fait l'objet d'analyses (Andersson et al., 2004). Les teneurs en PCB (somme des 7 congénères) varient non détecté à 290 mg/kg. Les teneurs les plus importantes sont obtenues sur les bâtiments les plus anciens (années 50 : médiane de 0,028 et années 60 : médiane de 0,015 mg/kg) et décroissent pendant les années 60 et 70 (médiane de 0,001 mg/kg). De plus les bâtiments à usage résidentiel semblent présenter les teneurs en PCB les plus importantes (médiane de 0,42 mg/kg). Les auteurs concluent à la nécessité de prendre en compte les plâtres comme source de pollution lors des chantiers de démolition. La transposition de cette problématique de la Norvège (lieu d'étude des auteurs) à la France n'est pas établie.
Radioactivité :
Le Syndicat National des Industries du Plâtre (2003-a et b) indique les ordres de grandeur de radioactivité du gypse utilisé pour la fabrication de carreaux et plaques de plâtre (< 40 Bq/kg pour la somme de la radioactivité de Ra226, Th232 et K40) par rapport à ceux d'autres données environnementales[12].
Production de H2S :
Le plâtre est un matériau réactif en milieu organique fermentescible (Daligand, 2002 ; Fiche BRGM ; http://www.arecpc.com/guide/inerte/postchant.html). Daligand (2002) indique que la formation de sulfure d'hydrogène H2S nécessite l'existence simultanée des conditions suivantes :

- présence d'eau ;
- présence de matières organiques ;
- ions sulfates en solution ;
- absence d'air ;
- présence de bactéries anaérobies (Desulfovibris, Desulfotomaculum) ;
- pH de 4 à 9 ;
- température ambiante entre 30 et 38 C.

Toutes ces conditions sont difficiles à réunir. Cependant, ces phénomènes conduisent à proscrire la mise en décharge des déchets de plâtre en mélange avec des déchets organiques (mélange avec des ordures ménagères en classe II).
Impuretés potentielles :
Les plâtres provenant du bâtiment peuvent présenter des pollutions issues des parements : peinture, colle, papier peint, etc.

Percolation/Lixiviation

Richer (2001) présente les résultats d'essais de lixiviation ou lessivages réalisés par l'ADEME sur des matériaux en plâtre issus de la démolition. Ces résultats figurent dans le tableau ci-dessous extrait du rapport BRGM de Richer. Ils mettent en évidence une très forte lixiviation du calcium et du sulfate, dont il résulte une fraction soluble importante.

[12] terre : 500-5000 Bq/kg pour la somme de la radioactivité de Ra226, Th232 et K40 ; corps humain 75 Bq/kg pour la radioactivité du K40 ; pomme de Terre 150 Bq/kg pour la radioactivité du K40 ; lait : 80 Bq/kg pour la radioactivité du K40

Résultats obtenus après lixiviation ou lessivage
(par application du protocole provisoire de lixiviation des déchets massifs et solidifiés : protocole SRETIE - Novembre 1991)
ADEME

(par application du protocole pro

Paramètres mesurés	Unité (1)	CARACTE			Limite de détection
		Carreau de plâtre	Plâtre	Plâco plâtre	
conductivité	S/cm	1980	1 565	1 563	
Humidité	% brut	13	15,3	15	
F.soluble	% LG	7,4	7,8	8,9	
COT	mg/kg de MS	< 69	24-71	1 070	2 mg/L
DCO	mg/kg de MS	< 345	496-614	3 152	10 mg/L
As	mg/kg de MS	< 0,17	< 0,18	< 0,176	5 µg/L
Cd	mg/kg de MS	< 0,035	< 0,035	0,098-0,12	1 µg/L
Cr	mg/kg de MS	< 0,35	< 0,35	< 0,35	10 µg/L
Cr6	mg/kg de MS	< 0,35	< 0,35	< 0,35	10 µg/L
Cu	mg/kg de MS	< 0,35	0,41	0,66	10 µg/L
Hg	mg/kg de MS	< 0,035	< 0,018	< 0,176	0,5 µg/L
Ni	mg/kg de MS	< 0,35	< 0,35	0,14-0,38	10 µg/L
Pb	mg/kg de MS	< 0,35	< 0,35	< 0,35	10 µg/L
Sn	mg/kg de MS	< 0,35	< 0,35	< 0,35	10 µg/L
V	mg/kg de MS	< 0,35	4,02	3,67	10 µg/L
Zn	mg/kg de MS	1	0,94	0,02-1,06	20 µg/L
Fluoranthène	mg/kg de MS				10 µg/L
Benzo b Fluoranthène	mg/kg de MS				10 µg/L
Benzo k Fluoranthène	mg/kg de MS				10 µg/L
Benzo a Pyrène	mg/kg de MS				10 µg/L
Benzo ghr pérylène	mg/kg de MS				20 µg/L
	mg/kg de MS				20 µg/L
Phénols	mg/kg de MS	< 1,72	< 1,77	< 1,76	50 µg/L
Ca	mg/kg de MS	22 496	23 722	23 609	1 mg/L
Al	mg/kg de MS				3 µg/L
Fe	mg/kg de MS		< 3,5	< 3,5	50 µg/L
Ti	mg/kg de MS				50 µg/L
Hydrocarbones totaux	mg/kg de MS				0,1 mg/L
Sulfates	mg/kg de MS	50 374	51 953	55 639	1 mg/L
Sulfures	mg/kg de MS	11	< 0,35	< 0,35	0,5 mg/L
Mn	mg/kg de MS				0,5 µg/L

(1) : l'unité retenue est le mg/kg de déch

Le BRGM (Fiche ***Déchets de plâtre : Évaluation des risques semi-générique)*** a réalisé une modélisation de l'impact sur les eaux souterraines d'un stockage de plâtre présentant une faible proportion de matière organique (papier, carton, etc.). Un certain nombre d'hypothèses, tendant à majorer les transferts, ont été formulées sur les caractéristiques du stockage (moins de 3% de matière organique, casier sans étanchéité en fond ni évacuation des lixiviats) et le contexte géologique et hydrogéologique.
Les résultats indiquent que pour des superficies de stockage de moins de 100 m sur 100 m, les concentrations en sulfates dans la nappe à 200 m en aval du stockage seront inférieures à la référence de qualité pour les eaux destinées à la consommation humaine (250 mg/L).

Kuryatnyk et al. (2010) ont étudié le comportement d'un mortier constitué de 25 % de plâtre de Paris (lui-même constitué de 60 à 80 % de sulfate de calcium hémihydrate (β) et d'anhydrite) et de 75 % de sable, soumis à des essais d'extraction du type Soxhlet. L'essai est mené sur 5 jours, avec de l'eau à 90-100°C et 19 cycles sont réalisés par jour.
Les lixiviats récupérés présentent une concentration en SO42- de entre 1 600 et 1 800 mg/L les 4 premiers jours et de 1 100 mg/L le 5ème jour. A la fin du test, plus de 7 800 mg/L de sulfates ont été récupérés et l'essai a conduit à la déstructuration de l'échantillon. En raison de cette déstructuration, des particules de sable ont été entrainées lors de l'essai, de ce fait on constate une perte de masse de l'échantillon est de 33 % à la fin du test.

Hétérogénéité des matériaux

Données d'écotoxicité et de toxicité

L'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) indique que les données toxicologiques disponibles ne permettent pas d'établir un niveau de concentration en sulfate dans l'eau de consommation au-delà duquel des effets sanitaires pourraient survenir (OMS, 2004). Certaines études par ingestion chez l'homme et le cochon indiquent des effets laxatifs à des concentrations de 1000 – 1200 mg/L, mais pas d'augmentation de l'incidence d'effets sanitaires tels que les diarrhées, la déshydratation et la perte de poids. Compte tenu de cet effet laxatif, il est donc recommandé que les concentrations en sulfates dans les eaux de boisson n'excèdent pas 500 mg/L et la valeur guide recommandée par l'OMS de 250 mg/L a été proposée car au-delà un gout est susceptible d'apparaitre, ainsi que des phénomènes de corrosion des réseaux de distribution. Cette valeur guide est reprise par le code de la santé publique français, comme valeur de référence pour les eaux destinées à la consommation humaines (hors eaux minérales).

Caractéristiques strictement agronomiques des matériaux

pH :
Le plâtre de Paris, constitué de 60 à 80 % de sulfate de calcium hémihydrate (β) et d'anhydrite, présente un pH dans l'eau interstitielle d'environ 7 (Kuryatnyk et al. 2010). De plus, Kuryatnyk et al. (2010) ont travaillé sur le comportement de plâtre de Paris, dont le pH est de 7,7.
Selon la norme NF EN 12859 de 2001[13], le pH surfacique (pH mesuré sur une dispersion dans 10 g d'eau d'un échantillon de 1 g raclé à la surface du carreau de plâtre) de chaque carreau de plâtre ne doit pas s'écarter des valeurs prescrites suivantes :

- carreau à pH normal : $6,5 \leq pH \leq 10,5$;
- carreau à faible pH : $4,5 \leq pH < 6,5$.

Potentiel améliorant :
Le gypse est classiquement utilisé comme amendement calcique, permettant d'améliorer la structure du sol, l'infiltration de l'eau. Il est également susceptible d'améliorer la croissance des plantes dans des conditions sodiques, en améliorant la disponibilité de nutriments comme le potassium et la phosphate, et en réduisant les phénomènes d'altération cellulaire, de baisse de la production et de l'élongation cellulaire rencontrés dans des condition sodiques (Howe et Wagner, 1996).
Howe et Wagner (1996) ont réalisé des essais d'arrosage et d'amendement de sols cultivés par des eaux usées sodiques de l'industrie papetière contenant du gypse.
Lors de l'application de doses croissantes de gypse pour une même dose d'eau usée, les essais pnt montré les effets suivants imputables à l'apport de gypse :

- Augmentation de la production de biomasse (peuplier) ;
- Augmentation de l'infiltration : de 1 à 3 cm/h pour le taux d'application de gypse le plus important testé ;
- Augmentation de la conductivité du sol dans l'horizon de surface : de 1 à 2,5 dS.m-1 pour le taux d'application de gypse le plus important testé ;'
- Faible diminution du pH du sol de 8 à 7,6 ;
- Augmentation de la teneur en Na dans les végétaux (Peuplier) au plus faibles doses de gypse testées, puis diminution pour les doses de gypse plus importantes.

Les auteurs concluent que le gypse améliore la tolérance des végétaux à l'épandage d'eaux usées sodiques.

Le gypse, associé à du compost, peut contribuer à réduire la disponibilité de certains métaux, dont le plomb et l'antimoine, dans le sol (Hashimoto et al., 2011).

Caractéristiques strictement mécaniques des matériaux

Dans le cadre de l'étude de Parres et al. (2009), des pièces prismatiques de 160 x 40 x 40 mm (essais de flexure) et de 40 x40 x 40 mm (essai de compression) de plâtre ont été constituées. Les essais ont été réalisés 28 jours après l'hydratation et le début de la prise. Les propriétés mécaniques de résistance à la compression et à la flexion ont été mesurées au moyen de la machine ELIB 30 by Ibertest (S.A.E. Ibertest, Madrid, Spain). Les résultats obtenus sont les suivants :

[13] Bien que faisant l'objet d'une révision sous la forme d'un document provisoire, cette norme fournit des ordres de grandeur des caractéristiques pour les carreaux de plâtre.

Table 2
Mechanical properties of neat plaster.

	Neat plaster
Flexural strength (MPa)	5.3
Compressive strength (MPa)	4.3

La résistance à l'eau du plâtre de Paris (constitué de 60 à 80 % de sulfate de calcium hémihydrate (β) et d'anhydrite) est faible en raison de sa solubilité élevée (8.9 to 9.5 CaSO4 g/L) (Kuryatnyk et al., 2010). Kuryatnyk et al (2010) ont étudié le comportement d'un mortier constitué de 25 % de plâtre de Paris et de 75 % de sable, plongé dans de l'eau à 20°C pendant un an. La résistance à la compression du mortier s'est révélée très faible et au-delà de 28 jours d'immersion dans l'eau, il n'était déjà plus possible de la mesurer.
Les propriétés mécaniques des enduits de plâtre et plâtre/chaux confectionnés sur chantier sont équivalentes : la résistance en flexion est supérieure ou égale à 1 N/mm², la résistance en compression est supérieure ou égale à 2 N/mm² (Daligand, 2002).
Selon la norme NF EN 12859 de 2001, la résistance à la flexion des carreaux de plâtre (d'une longueur supérieure ou égale à 650 mm et d'une hauteur de 500 mm) doit être au minimum de 1,7 kN pour un carreau de 50 mm d'épaisseur et de 4 kN pour un carreau de 100 mm d'épaisseur. Bien que faisant l'objet d'une révision sous la forme d'un document provisoire, cette norme fournit des ordres de grandeur des caractéristiques mécaniques de ces matériaux.

Bibliographie :

Site internet ADEME, A chaque déchet, des solutions.
Andersson M., Ottesen R. T. et Volden T. (2004) Building materials as a source of PCB pollution in Bergen, Norway, Science of the Total Environment, vol. 325, pp. 139–144.
http://www.arecpc.com/guide/inerte/postchant.html
Fiche BRGM Déchets de plâtre Évaluation des risques semi-générique : http://www.brgm.fr/brgm/references/Fichiers/fiches_ref_SP/2006_POL_06.pdf
Carrillo L., Emile F., Castaldi G., Perrin B. et Wagner C. (2009). Matériaux minéraux potentiellement utilisables en espaces verts : matériaux alternatifs pour les mélanges Terre-Pierre établis à partir de la classification européenne des déchets. Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest.
Daligand D. (2002) Plâtre, Techniques de l'ingénieur, C910 10 mai 2002.
Hashimoto Y., Yamaguchi N., Takaoka M. et Shiota K. (2011) EXAFS speciation and phytoavailability of Pb in a contaminated soil amended with compost and gypsum, Science of the Total Environment, vol. 409, pp. 1001–1007.
Howe J. et Wagner M. R. (1996) The effect of papermill wastewater irrigation and gypsum soil amendments on sodium accumulation by cottonwood and soil, Agricultural Water Management vol. 31, pp. 295-306.
Kuryatnyk T., Chabannet M., Ambroise J. et Pera J. (2010) Leaching behaviour of mixtures containing plaster of Paris and calcium sulphoaluminate clinker, Cement and Concrete Research, vol. 40, pp. 1149–1156.
Site internet Les Industries du Plâtre : http://www.lesindustriesduplatre.org/
Les industries du Plâtre (2008) Charte de Gestion des Déchets de Plâtre, du 30 janvier 2008.
Les industries du plâtre (2007) Colloque 2007 : Du gypse au plâtre au Cœur de la construction durable, dossier de presse Octobre 2007.
Norme NF EN 12859 (Décembre 2001) Carreaux de plâtre : Définitions, spécifications et méthodes d'essai.
Organisation Mondiale de la Santé - OMS (2004) Guidelines for Drinking-water Quality, 3ème édition, volume 1 : recommandations.
Parres F., Crespo-Amorós J. E., Nadal-Gisbert A. (2009) Mechanical properties analysis of plaster reinforced with fiber and microfiber obtained from shredded tires, Construction and Building Materials, vol. 23, pp. 3182–3188.
Richer G. avec la collaboration de Carbonnier P., Koch-Mathian J.-Y. (2001) Matériaux de démolition en région Nord-Pas-de-Calais : Recommandations de stockage et de recyclage, Rapport BRGM/RP-50604-FR, 54 p.
Site internet de la Société Chimique de France : http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/mater/platre/texpla.htm :
SOeS Commissariat gal au développement durable, Chiffres & statistiques N°164 octobre 2010.
Syndicat National des Industries du Plâtre (2003-a) Caractéristiques Environnementales et Sanitaires suivant la norme XP P01-010 : Plaque de plâtre BA 13.
Syndicat National des Industries du Plâtre (2003-b) Caractéristiques Environnementales et Sanitaires suivant la norme XP P01-010 : Carreau de plâtre.
http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=4731

Compost déclassé : 19-05-03

19 05 03	Compost déclassé	Déchets de compostage	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel

Les matériaux étudiés ici sont des composts réalisés à partir de différents types de déchets (fumier, déchets verts, boues de stations d'épuration…) ne correspondant pas aux normes AFNOR permettant leur mise sur le marché :

- norme NFU44-051 (amendement organique, il s'agit de composts à base de matières organiques de différentes origines sauf les boues de station d'épuration) ;
- norme NFU44-095 (composts à base de boues de station d'épuration).

La composition de ce matériau sera donc variable, du fait de la variabilité des déchets qui le composent. On distinguera pour plus de facilité :

- Le **compost constitué de boues issues du traitement des eaux**, déclassé car ne répondant pas à la norme NFU44-095.
- Le **compost « agronomique »** issu des déchets suivants : fumiers, déjections animales sans litière, fumiers/lisier/fientes compostées, compost vert, composts de fermentescibles alimentaires et/ou ménagers, matière végétale (en mélange ou non), mélange de matières végétales et animales, compost végétal, compost de matières végétales et animales, compost de champignonière. Ce compost est déclassé car il ne répond pas à la norme NFU44-051.

[Source: Wiki LCA: http://wiki.laboratoirelca.com/index.php/Accueil]

D'autre part, les boues de station d'épuration faisant l'objet d'une autre fiche, le compost de boues ne sera pas abordé ici. Son comportement physico-chimique sera en effet proche de celui des boues en sortie de station. **Le compost de boues sera donc traité au sein de la fiche consacrée à ces boues**. Cette fiche ne traitera donc que du compost déclassé dit « agronomique ».

Ce compost est constitué d'une **part variable de matière sèche**, selon ses constituants individuels :

- Déchets verts compostés et compost végétal industriel, compost de biodéchets : de 60 à 70% de matière sèche ;
- Fumier de bovins : 25% de matière sèche ;
- Fumier de volailles : de 40 à 80% de matière sèche ;
- Lisier de porcs : 8% de matière sèche.

[Source : Ordres de grandeurs fournis par Plante et Cité]

Le rapport C/N du compost semble être d'environ 15-20%.

[Source : http://www.gcp-compost.ch/caracteristiques.php]

Cette fiche traitant du compost déclassé car il ne répond pas à l'un au moins des paramètres fixés par les normes AFNOR, il est difficile de prévoir lequel de ces paramètres ne sera pas respecté. De plus, il s'agit d'un matériau en mélange variable, et de ce fait une forte variabilité existe pour les paramètres physico-chimiques. **Il est donc irréaliste de chercher à obtenir des valeurs précises caractérisant ces matériaux.**

Cette fiche sera rédigée dans l'hypothèse que le **produit déclassé et le produit classé ont des comportements physico chimiques comparables**. **Les valeurs proposées à titre indicatif sont sujettes à de fortes variations selon le compost considéré.**

Caractéristiques physiques des matériaux

Portance

Aucune mesure de ce paramètre n'a pu être trouvée. On peut estimer que la portance de ce matériau est non nulle. Elle est cependant probablement de l'ordre du « faible », du fait de sa forte porosité.

Portance	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Forte

Conductivité des lixiviats

La détermination de la conductivité du compost selon la norme ISO 11265 se fait sur extrait filtré. Cette mesure donne donc une bonne idée de la conductivité des lixiviats. Une étude sur différents mélanges de compost (à base de fumier d'ovins, bovins, de volailles et de paille broyée) donne (avec cette méthode) en fin de processus de compostage des valeurs de **1,19 à 1,33 mmoh/cm.**

Notons toutefois que ces valeurs sont signalées comme non significatives dans la publication.

[Source : Etude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes, I. El Akram, Mediterranien Agronomis Institute of Bari, 2002]

Densité apparente

La densité apparente du compost est extrêmement variable, puisqu'elle dépend de sa composition initiale (taille des matériaux et porosité), ainsi que de l'avancement du processus de compostage (la densité apparente diminue avec l'avancement).

Quelques valeurs peuvent malgré tout être citées, afin de donner une idée de la valeur de ce paramètre :

- Une publication fait état d'une masse volumique apparente moyenne du compost de **200 à 400 kg/m^3 environ**.
  [Source: Bulk density and porosity distributions in a compost pile, J.T. Van Ginkel et al, Netherlands Journal of Agricultural Science 47, 1999]
- Un ouvrage qualifie d'"**élevée**" une masse volumique apparente de **775 kg/m^3**. Cette mesure a été effectuée sur du compost ménager de 4-6 mois. On peut donc supposer que la fourchette précédente était plus proche de la réalité.
  [Source : Les enjeux internationaux du compostage, B.K. Martin, l'Harmattan, 2000]

Perméabilité à l'eau

Ce paramètre est également très variable, car il dépend notamment de la taille des pores, donc de l'avancement du compostage, et des matériaux choisis.

Aucune donnée concernant directement la perméabilité à l'eau du compost n'a pu être trouvée. Cependant, le comportement du compost sera proche de celui de l'horizon humifère d'un sol. On sait de ce dernier qu'il est très perméable, car il est essentiellement composé de débris grossiers en décomposition.

La porosité élevée du compost devrait permettre à l'eau de circuler assez facilement. En effet, un compost d'étude (compost ménager de 4-6 mois), présente une **porosité de 78%.** Cette mesure a été qualifiée de « faible » par l'auteur de l'ouvrage concerné. On s'attend à ce que les pores du compost soient de tailles et formes variables.

[Source: Bulk density and porosity distributions in a compost pile, J.T. Van Ginkel et al, Netherlands Journal of Agricultural Science 47, 1999]
Malgré l'absence de données quantitatives, on conclura à une **perméabilité** du matériau.

Perméabilité à l'eau		
Gamme	**Appréciation quantitative Ks (m/s)**	**Appréciation qualitative**
0	$10^{-2} \leq Ks < 10^{-4}$	Perméable
1	$10^{-4} \leq Ks < 10^{-7}$	Semi perméable
2	$10^{-7} \leq Ks < 10^{-10}$	Imperméable
3	$Ks \geq 10^{-10}$	Très imperméable

Structure (agrégation)

Aucune agrégation n'aura lieu a priori, du fait de la taille des éléments composant le compost.

Structure	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Bonne

Granulométrie

Considérant la taille des particules constituant usuellement le compost, il est attendu que la granulométrie de ce dernier soit grossière.

Ceci semble confirmé par une plaquette de caractérisation d'un produit de compostage des déchets verts, dans laquelle le compost « fin » possède une granulométrie **de 0 à 10 mm**, et le compost « moyen » se situe dans la fourchette de **0 à 20 mm**.

Si certaines particules du compost final pourront être de petite taille, on retiendra que **le matériau dans son ensemble conserve une granulométrie grossière**.

[Source : Le compostage des déchets verts, plaquette d'information éditée par le centre de recyclage de Limoges métropole]

Granulométrie		
Gamme	**Appréciation quantitative Taille de particules**	**Appréciation qualitative**
0	T < 2 µm	Argileux
1	2 ≤ T < 50 µm	Limoneux
2	50 ≤ T < 2 mm	Sableux
3	T ≥ 2 mm	Grossier

Caractéristiques agronomiques des matériaux

pH

Plusieurs valeurs existent dans la littérature pour ce paramètre :

- Un pH de **8,3** pour un compost ménager de 4-6 mois [Source : Les enjeux internationaux du compostage, B.K. Martin, l'Harmattan, 2000]
- Un pH moyen du compost compris **entre 6 et 8** (correspondant au pH optimum des bactéries réalisant le compostage) [Source : Disponibilité de l'azote des composts utilisés en agriculture biologique, ITADA, 1999-2001]
- Un pH de **8,11** pour un compost de déchets verts. [Source : Le compostage des déchets verts, plaquette d'information éditée par le centre de recyclage de Limoges métropole]

Le pH du compost peut donc être globalement qualifié de basique. On retiendra malgré la fourchette de 6 à 8, car elle correspond à une moyenne sur divers types de compost, et non à une unique expérience.

pH		
Gamme	**Appréciation quantitative Valeurs de pH**	**Appréciation qualitative**
0	pH < 5	Acide
1	5 ≤ pH < 6,5	Acide/neutre
2	6,5 ≤ pH < 7,5	Neutre
3	pH ≥ 7,5	Basique

$CaCO_3$ total

Il peut y avoir du $CaCO_3$ dans certains composts contenant par exemple du fumier bovin. En effet, la ration alimentaire de ces derniers comprend du $CaCO_3$. En moyenne, et dans ce cas précis, on peut trouver **une part d'environ 0,9% de $CaCO_3$** dans la composition du compost.

[Source: Liming Effects of Beef Cattle Feedlot Manure and Composted Manure, B. Eghball, University of Nebraska – Lincoln, 2002.]

Notons toutefois qu'il n'est pas possible de généraliser cette donnée, car la composition du compost n'inclut pas nécessairement du fumier bovin. On pourra retenir pour ce paramètre l'ordre de grandeur « faible ».

Carbonatation		
Gamme	**Appréciation quantitative Pourcentage de $CaCO_3$**	**Appréciation qualitative**
0	0%	Absente
1	0≤ $CaCO_3$ < 1 %	Faible
2	1 ≤ $CaCO_3$< 10 %	Moyenne
3	$CaCO_3$ ≥ 10 %	Importante

N total

Les composts de déchets verts présentent une teneur en N total de 15,5 g/kg-MS (guide ADEME 1997, moyenne de l'analyse de 299 composts). Considérant une teneur en matières sèches de 70%, l'azote total représente 11% du produit brut.

Carbone organique

La part organique du compost est non négligeable.

- La matière organique représente environ **30% de la matière totale sur produit brut**, et **48% sur produit sec**. Par ailleurs, la norme NF U 44-051 fixe les taux minimaux à atteindre pour qu'un compost soit commercialisable : **>20% sur produit brut, et >30% sur produit sec.** [Source : Le compostage des déchets verts, plaquette d'information éditée par le centre de recyclage de Limoges métropole]
- Une mesure sur compost ménager présentant une valeur de **38% de matière organique sur produit sec** est qualifiée de « normale » dans un ouvrage traitant du compost. [Source : Les enjeux internationaux du compostage, B.K. Martin, l'Harmattan, 2000]
- La ferme expérimentale d'AgroParisTech (Institut du vivant et de l'Environnement) stipule qu'un compost bien terminé présente un taux de matière organique représentant de **25 à 50%** du poids total. [Source : AgroParisTech, Ferme expérimentale, http://www.agroparistech.fr/energiepositive/Processus-de-degradation-aerobie.html]

Une nouvelle fois, le compost montre une forte variabilité. On retiendra que la matière organique représente **une gamme de 25 à 50%** de poids total sur produit brut.
Le carbone organique pourra être déduit de cette donnée.
[Source : Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme, M. Giroux et P. Audesse, Agrosol productions animales, déc. 2004]

CEC

Une étude de l'ITADA portant sur le compost lui prête une CEC variant **de 100 à 600 méq/100g**, avec les mentions suivantes :

- 100 à 200 méq/100g ➔ CEC faible
- 200 à 600 méq/100g ➔ CEC élevée

[Source : Disponibilité de l'azote des composts utilisés en agriculture biologique, ITADA (Institut Transfrontalier d'Application et de Développement Agronomique), 1999-2001]
Une autre donnée corrobore cette première estimation : un rapport estime que 1% de M.O. dans la matière constituant l'humus contribue (dans les sols français) à la CEC à hauteur d'environ 2 meq/100g. Or, l'humus est structurellement proche du compost, comme dit précédemment. Ainsi, le compost comprenant entre 25 et 50% de M.O., il contribuerait à la CEC dans un sol, selon cette estimation, à hauteur d'environ **50 à 100 meq/100g.** La fourchette diffère de celle vue précédemment (CEC plus faible), mais l'ordre de grandeur est similaire. L'écart peut être dû à l'hypothèse que le compost et l'humus sont relativement similaires.
En tous les cas, **la CEC de l'humus est élevée, tout comme celle du compost.**
[Source : http://www.agro-systemes.com/guide-agronomique/guide-agro-p16.htm]

P assimilable

Plusieurs données sont disponibles quant au Phosphore dans le compost. Celui-ci semble essentiellement être présent sous forme d'**acide phosphorique P_2O_5**.

- Le P_2O_5 représenterait **0,59%** dans un compost ménager de 4-6 mois.
  [Source : Les enjeux internationaux du compostage, B.K. Martin, l'Harmattan, 2000]
- Sur du compost commercialisable par la ville de Limoges, le Phosphore total représenterait **0,6%** (sous forme d'acide phosphorique) sur produit brut, et **0,62%** sur produit sec.
  [Source : Le compostage des déchets verts, plaquette d'information éditée par le centre de recyclage de Limoges métropole]

- Une caractérisation d'un produit destiné à la vente par une usine de compostage propose une teneur de **1,8%** d'acide phosphorique sur produit brut, face à **0,3%** sur produit sec.
  [Source : **http://www.agro-systemes.com/guide-agronomique/guide-agro-p16.htm]**

En conclusion, il existe encore une fois une variabilité d'une source à l'autre.

L'assimilabilité de cette forme de phosphore est également variable. **Elle diminue avec l'augmentation du pH**.

[Source : http://www.agro-systemes.com/lexique-agronomique.inc.php?element=phosphore]

Il reste difficile de quantifier exactement la part de phosphore assimilable dans un compost. **On retiendra ici l'appréciation qualitative « élevée »** quant à la disponibilité de phosphore assimilable, car un taux de 0,6% de phosphore dans le compost correspondrait à 6 g/kg, ce qui est bien au-dessus du seuil déterminé pour la gamme « élevée ».

P assimilable		
Gamme	**Appréciation quantitative P assimilable (g/kg) préciser méthode d'extraction**	**Appréciation qualitative de la fertilité phosphatée**
0	P < 0,04	Très faible
1	0,04 ≤ P < 0,08	Médiocre
2	0,08 ≤ P < 0,12	Normale/correcte
3	P ≥ 0,12	Elevée

Caractéristiques de dangerosité des matériaux

pH sur éluat

A priori, il n'existe pas d'information spécifique sur les éluats de compost. Cependant, le pH du compost est déjà mesuré sur une suspension de matière, en accord avec la norme ISO 10390.

Une étude donne des mesures de pH sur extrait filtré de compost élaboré à partir de divers mélanges : du fumier d'ovins, de bovins, de volailles, et de la paille broyée. Le pH déterminé est compris selon les mélanges effectués **entre 7,24 et 7,79**. Notons toutefois que les résultats fournis sont non significatifs.

[Source : Etude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes, I. El Akram, Mediterranien Agronomis Institute of Bari, 2002]

Teneur ou concentration totale en polluants

Il arrive que les **métaux lourds** soient des oligo-éléments présents en quantités excessives, devenus de ce fait toxiques pour les plantes, les animaux, et l'être humain du fait d'une trop grande concentration. Les métaux concernés sont les suivants : cuivre, zinc, cobalt, molybdène…

Le mercure, le cadmium et le plomb comptent aussi parmi les substances à éviter.

Des valeurs mesurées sur compost de déchets organiques sont citées ci-après:

- Plomb 17 mg/kg,
- Cuivre 41 mg/kg
- Zinc 176 mg/kg
- Nickel 29 mg/kg
- Cadmium 0,5 mg/kg

[Source : Les enjeux internationaux du compostage, B.K. Martin, l'Harmattan, 2000]

De plus, des **engrais et des pesticides** peuvent être présents si des plantes traitées ont été mises à composter. Leur concentration et leur typologie est impossible à caractériser de façon générique.

On choisira donc la mention « **Contamination possible** ».

Teneur/Concentration totale des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	En trace
2	Contamination possible
3	Contamination fréquente

Disponibilité des polluants

- Pesticides et engrais : La disponibilité dépend des molécules en présence, qui sont variées. Elles peuvent se dégrader en divers composés intermédiaires aux comportements également variables. Il existe des possibilités d'adsorption, de minéralisation, ou au contraire de forte mobilité selon l'hydrophilie et la taille de la molécule considérée.

Il est donc impossible de donner un profil de disponibilité général pour les engrais et pesticides.

- Métaux : Leur toxicité dépend de leur spéciation autant que des facteurs environnementaux. Dans le sol, ils sont sous forme libre, ou liée à des particules du sol. Une toxicité existe uniquement si les métaux sont sous forme libre, et donc **biodisponibles**.

La biodisponibilité des métaux dépend du pH, de la CEC, du potentiel redox, de la teneur en phosphates disponibles, de la teneur en matière organique, et de l'activité biologique du sol ou du milieu dans lequel se trouvera le compost.

[Source : Impact des métaux lourds sur l'interaction plante/ver de terre/microflore tellurique, T.M.D. Huynh, Thèse de doctorat, Université de Paris Est, 2009]

Disponibilité des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	Très faible/négligeable
2	Possible en différé
3	Possible en immédiat

Bibliographie

Ouvrages et documents publiés

- Bulk density and porosity distributions in a compost pile, J.T. Van Ginkel et al, Netherlands Journal of Agricultural Science 47, 1999
- Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme, M. Giroux et P. Audesse, Agrosol productions animales, déc. 2004
- Disponibilité de l'azote des composts utilisés en agriculture biologique, ITADA, 1999-2001
- Etude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes, I. El Akram, Mediterranien Agronomis Institute of Bari, 2002
- Impact des métaux lourds sur l'interaction plante/ver de terre/microflore tellurique, T.M.D. Huynh, Thèse de doctorat, Université de Paris Est, 2009
- Le compostage des déchets verts, plaquette d'information éditée par le centre de recyclage de Limoges métropole
- Les enjeux internationaux du compostage, B.K. Martin, l'Harmattan, 2000
- Liming Effects of Beef Cattle Feedlot Manure and Composted Manure, B. Eghball, University of Nebraska – Lincoln, 2002.

Liens internet:

- Portail agronomique de Wikipédia recensant et décrivant les normes AFNOR : http://wiki.laboratoirelca.com/index.php/Accueil
- Site de professionnels du compostage : http://www.gcp-compost.ch/caracteristiques.php
- Site internet de la ferme expérimentale AgroParisTech (école d'ingénieurs agronomes) : http://www.agroparistech.fr/energiepositive/Processus-de-degradation-aerobie.html
- http://www.agro-systemes.com/guide-agronomique/guide-agro-p16.htm

Les boues provenant de ERU: 19-08-05

19 08 05	boues provenant du traitement des eaux usées urbaines	Déchets provenant d'installations de traitement des eaux usées non spécifiés ailleurs	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel

Les boues de station d'épuration sont de nature très diverse :

- Boues liquides
- Boues solides
- Boues pâteuses
- Boues chaulées
- Boues compostées
- Boues sèche

Dans cette fiche, nous essaierons d'aborder les caractéristiques de ces boues.

	Boue liquide	**Boue pâteuse**	**Boue sèche**	**Boue chaulée**	**Boue compostée**
Teneur en MS (% du produit brut)	2 à 7	16 à 22	90 à 95	25 à 40	40 à 60
Teneur en MO (% de la MS)	65 à 70	50 à 70	50 à 70	30 à 50	80 à 90
Teneur en matière minérale (% de la MS)	30 à 35	30 à 35	30 à 35	50 à 70	10 à 20
Rapport C/N	4 à 5	5 à 6	4 à 6	8 à 11	15 à 25
Azote (kg N/t brute)	2 à 4	8 à 12	30 à 50	6 à 9	5 à 9

De plus, les caractéristiques des **composts de boues** sont aussi intégrées dans cette fiche.
Celle-ci traitera également des boues appartenant à la catégorie 19 08 12 du Catalogue Européen des Déchets, qui traite de certaines boues industrielles issues de traitement biologique. Cette catégorie étant définie « par défaut » (elle regroupe l'ensemble des boues industrielles non représentées par une catégorie à part entière dans le catalogue), il est difficile d'en fournir une caractérisation individuelle. Elles sont donc associées aux boues urbaines, décrites dans la présente fiche.

19 08 12 Repêché	boues provenant du traitement biologique des eaux usées industrielles autres que celles visées à la rubrique 19 08 11	Déchets provenant d'installations de traitement des eaux usées non spécifiés ailleurs	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :

Caractéristiques physiques des matériaux

Portance

Selon le type de boues considérées, la siccité des boues de stations d'épuration varie :

	Boue liquide	**Boue pâteuse**	**Boue sèche**	**Boue chaulée**	**Boue compostée**
Teneur en MS (% du produit brut)	2 à 7	16 à 22	90 à 95	25 à 40	40 à 60

Les boues sèches vendues dans le commerce doivent présenter une résistance à l'écrasement supérieure à 30 N (Pasquet, 2007).

Les boues sèches peuvent présenter une résistance à l'écrasement comprise entre 30 et 50 N. (Thirion, Chabot, 2003).

Conclusion :

Selon le type de boues, la portance des boues de stations d'épuration varie : les boues liquides ont une portance nulle (si on associe leur composition à de l'eau), les boues sèches peuvent présenter une portance faible.

Portance	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Forte

Les données que nous avons obtenues ne correspondent qu'à des notions de résistance à l'écrasement.

Conductivité des lixiviats

Une analyse sur un compost de boues indique une conductivité de 1,65 $mS.cm^{-1}$ (IT/AME 02 selon NF EN 12176) (Bagur, 2012)

Conclusion :

Le compost de boues présente une conductivité de 1,65 $mS.cm^{-1}$.

Densité apparente

Le taux de matières sèches varie fortement entre les boues fraîches constituées d'eau à plus de 95 % et les boues sèches dont la siccité est de plus de 95 %.

Expérience au Cemagref de Clermont-Ferrand sur des boues sèches granulées dont la siccité était de 94,55 % : la densité de ces boues était de 0,622 (Thirion, Chabot, 2003).

La densité minimale des boues séchées imposée par le marché est de 0,5 (Pasquet, 2007).

Conclusion :

La densité des boues de stations d'épuration urbaines est comprise entre 0,5 (boues séchées vendues) et 1 (boues liquides). On considère que les boues liquides ont la densité de l'eau. Les boues séchées ont une densité au moins égale à 0,5 si elles sont vendues. Cependant l'exemple du Cemagref tend à nous faire penser que la densité des boues sèches pourrait être plus élevée.

Pas d'information sur les composts de boues.

Perméabilité à l'eau

Les boues sont essentiellement composées d'eau, on peut donc penser qu'elles sont perméables. Cependant, aucune donnée chiffrée n'a été obtenue.

Conclusion :

Aucune donnée chiffrée n'a été trouvée concernant la perméabilité à l'eau des boues.

Structure (agrégation)

Des travaux sur la déshydratation des boues ont par exemple montré que les boues résiduaires suffisamment épaisses avaient un comportement non newtonien, à seuil, et souvent thixotrope. Outre les interactions chimiques, des interactions physiques peuvent se produire entre les constituants de la boue. En proportions variables d'un échantillon à un autre, on trouve dans la boue des colloïdes, minéraux et organiques, et des grains solides. Cette variété de particules induit différents effets rhéologiques (Baudez, Coussot, Thirion, septembre 1998). Les boues sèches se présentent sous la forme de granulés (Nouvelles Technologies au Service de l'Environnement).

Conclusion :

Lorsque les boues sont sèches, elles se présentent sous la forme de granulés.

Structure	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne

3	Bonne

Granulométrie

Deux sources nous ont permis d'estimer la granulométrie des boues de stations d'épuration.
Caractéristiques des boues séchées imposées au marché :

- Granulométrie comprise entre 2 et 5mm pour 99% des particules ;
- Avec % particules<1mm : 1%max avec un % poussières <63µm inférieur ou égal à 0.1% (Pasquet, 2007).

Granulométrie d'un séchage indirect de boues fraîches urbaines (mixtes) avec 90 % en MS : 11 % des particules ont un diamètre inférieur à 2 mm, 61 % entre 2 et 4 mm, 28 % entre 4 et 6 mm (Les Nouvelles Technologies au Service de l'Environnement).

Conclusion :

Les boues séchées sont de granulométrie grossière (>2 mm).

Cependant, les données obtenues ne concernent pas les autres types de boues.

Granulométrie		
Gamme	**Appréciation quantitative Taille de particules**	**Appréciation qualitative**
0	T < 2 µm	Argileux
1	2 ≤ T < 50 µm	Limoneux
2	50 ≤ T < 2 mm	Sableux
3	T ≥ 2 mm	Grossier

Caractéristiques agronomiques des matériaux

pH

Valeurs de pH (Delery & al., 2007)[14] :

	Boue liquide	**Boue pâteuse**	**Boue sèche**	**Boue chaulée**	**Boue compostée**
pH	6,5 à 7	7 à 8	6 à 8	9 à 12	6 à 7

Type boue	**pH**	**Référence**
Toutes boues chaulées (« moyenne »)	11,3 (moyenne)	(Barbe & al., 2002)
Boues non définies	5,95-11,95 Moyenne : 8	(PWD, 2010)
Boues fraîches d'ERU	7	(Guibelin E., 1999)

Une analyse de compost de boues de station d'épuration présente un pH de 8,2 (Bagur, 2012).

Conclusion :

La gamme de valeur est très large concernant le pH des boues de stations d'épuration. Selon le type de boues considéré, les valeurs varient. On peut cependant considérer les boues chaulées comme basiques, ainsi que les composts.

pH		
Gamme	**Appréciation quantitative Valeurs de pH**	**Appréciation qualitative**
0	pH < 5	Acide
1	5 ≤ pH < 6,5	Acide/neutre
2	6,5 ≤ pH < 7,5	Neutre
3	pH ≥ 7,5	Basique

[14] Ces chiffres sont repris sur le site internet de l'ADEME

$CaCO_3$ total

Le pourcentage de $CaCO_3$ est de 20 % dans les matières minérales (Guibelin, 1999).

Une analyse sur une boue de station d'épuration « type » donne un pourcentage de CaO de 5,13 % sur la MS (Bagur, 2012).

Conclusion :

Selon la siccité des boues, la proportion de $CaCO_3$ dans les boues de stations d'épuration varie. Aucune fourchette ne peut être définie.

N total

Selon le type de boue, la teneur en azote total varie :

	Boue liquide	Boue pâteuse	Boue sèche	Boue chaulée	Boue compostée
Teneur en MS (% du produit brut)	2 à 7	16 à 22	90 à 95	25 à 40	40 à 60
Azote (kg N/t brute)	2 à 4	8 à 12	30 à 50	6 à 9	5 à 9

Composition moyenne des boues urbaines en Europe en 1998 : N total = 5 %.

Carbone organique

La teneur des boues chaulées en carbone organique est de 23 % de MS, soit 63 kg/ t brute en moyenne (Barbe & al., 2002).

Pour les composts de boues, une analyse donne la valeur de 230 $g.kg^{-1}$ de carbone organique sur sec et de 139 $g.kg^{-1}$ de carbone organique sur brut.

Conclusion :

La teneur en carbone organique est estimée à 23 % de la MS.

CEC

Pas de données obtenues concernant la CEC.

P assimilable

Teneur des boues en P Olsen (assimilable) (Sommellier & al., 1996) :

Type de boues	P Olsen ($g.kg^{-1}$ MS)
Boues primaires (Orléans)	**0,19**
Boues d'aération prolongée (Briare)	**0,87**
Boues activées (Blois)	**3,9**
Boues digérées, conditionnées thermiquement et filtrée sur filtre presse (Paris-Acheres)	**0,38**
Boue floculée à $FeSO_4$, digérée et séchée sur filtre à bande (Orléans)	**0,36**

Conclusion :

Quelques soient les boues étudiées, leur quantité de phosphore assimilable est toujours supérieure à 0,12 g/kg de MS.

P assimilable		
Gamme	**Appréciation quantitative P assimilable (g/kg) préciser méthode d'extraction**	**Appréciation qualitative de la fertilité phosphatée**
0	P < 0,04	Très faible
1	0,04 ≤ P < 0,08	Médiocre
2	0,08 ≤ P < 0,12	Normale/correcte
3	P ≥ 0,12	Elevée

Caractéristiques de dangerosité des matériaux

pH sur éluat

Pas de données obtenues concernant le pH sur éluat.

Teneur ou concentration totale en polluants

Variation des teneurs en éléments traces des boues résiduaires urbaines (g/tonne de MS) (Conseil supérieur d'hygiène publique de France, 1998) :

Polluant	Moyenne	Médiane
Cd	5,3	4,5
Pb	113	107
Cr	80	64
Cu	334	286
Ni	39	25
Se	7,4	3,2
Zn	921	761
Hg	2,7	2,1

Teneur en polluants dans les composts de boues d'épuration (Bagur, 2012) :

Polluant	Teneur ($mg.kg^{-1}$)
Chrome	27,6
Cuivre	136
Nickel	15,4
Zinc	355
Arsenic	3,4
Cadmium	0,9
Plomb	54,1
Mercure	0,4
Sélénium	1,3

Conclusion :

Teneur/Concentration totale des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	En trace
2	Contamination possible
3	Contamination fréquente

Disponibilité des polluants

Pas de données obtenues concernant la disponibilité des polluants.

Bibliographie

Ouvrages et documents publiés

Les boues chaulées des stations d'épuration municipales, production, qualité et valeur agronomique, BARBE J., BROCHETON D., KOCKMANN F., WIART J., Novembre 2002

Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGRNE), 2010, Horizon 2010 Plan wallon des déchets PWD, http://environnement.wallonie.be/rapports/owd/pwd/index.htm

Epandage des boues résiduaires et effluents organiques / matériels et pratiques, Thirion François, Chabot Frédéric, 2003, Cemagref Editions

Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandages des boues de stations d'épuration : introduction générale, Déléry L., Gay G., Denys S., Pique M.-L., Coftier A., octobre 2007, http://www.ineris.fr/centredoc/Guide-Boues-v1_3-Introduction-Generale.pdf

Lutte contre la pollution des eaux - Traitements des boues d'épuration, Guibelin E., 10 avril 1999, Techniques de l'ingénieur, Référence G1450

Rhéologie des boues de stations d'épuration : études préliminaires pour la maîtrise des stockages et épandages, Baudez Jean-Christophe, Coussot Philippe, Thirion François, septembre 1998, Ingénieries – EAT – N° 15,– p 33 à 46

Risques sanitaires liés aux boues d'épuration des eaux usées urbaines, Conseil supérieur d'hygiène publique de France, 1998, Ed. Tec & Doc

La valeur phosphatée des boues résiduaires des stations d'épuration urbaines, Sommellier L., Morel J.-L., Morel C., Wiart J., 1996, guides et cahiers techniques

Document Excel Analyses produits types, document obtenu sur demande auprès de Mme BAGUR du bureau d'études SEDE environnement, le 8/02/2012

Liens internet

La valeur agronomique des boues d'épuration, site internet de l' ADEME, http://www.ademe.fr/partenaires/boues/pages/f22.htm, consulté le 29/01/2012

Les sécheurs de la station d'épuration de Strasbourg-La Wantzenau, groupe de réflexion sur le séchage thermique de step, Pasquet N., décembre 2007, http://www.astee.org/agenda/compte_rendu/fichiers/20071220%20Sechage%20thermique%20des%20boues/08Strasbourg.pdf

Différentes formes de boues séchées, Les Nouvelles Technologies au Service de l'Environnement, http://www.ntenvironnement.com/boue.asp, consulté le 02/02/2012

Le lagunage naturel, les leçons tirées de 15 ans de pratique en France, Racault Yves & al., 1997, Coédition Cemagref Editions, Agence de l'Eau Loire-Bretagne :

	Boues de lagune	Boue aérobie stabilisée
Matière sèche (g/L)	50-250	
Matières volatiles (% de MS)	20-50	45-60
Azote Kjeldhal (mg/g)	0,8-3,3	4,5-6
Phosphore total (mg/g)	1-2,2	4-8,5
Potassium (K_2O, mg/g)	0,03	0,5-1,5

Minéraux (par exemple : sable, cailloux) provenant du traitement mécanique des déchets : 19-12-09

19 12 09	minéraux (par exemple : sable, cailloux)	Déchets provenant du traitement mécanique des déchets (par exemple : tri, broyage, compactage, granulation) non spécifiés ailleurs :	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :

Lors de l'étape de bibliographie préliminaire, ces déchets minéraux issus des installations de gestion des déchets n'ont pas été identifiés. En revanche, des données sur les déchets minéraux provenant du traitement des eaux ont été retrouvées. Ce sont donc ces déchets qui ont été notés.

19 08 02	déchets de dessablage	Déchets provenant d'installations de traitement des eaux usées non spécifiés ailleurs	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel :

Le dessablage consiste à faire circuler l'eau dans un bac avec une vitesse suffisamment faible pour que le sable ait le temps de décanter, c'est à dire de tomber au fond du bac où il pourra être récupéré (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009). De nombreux systèmes existent : dessableur couloir, rectangulaire ou circulaire avec ou sans brassage à l'air (pour le lavage des sables) et des ouvrages combinant les fonctions dessableur-dégraisseur. Dans tous les cas, les sables retenus sont stockés à la base de l'ouvrage avant d'être repris manuellement, par pompage ou par béduvé (Canler et Perret, 2004). Souvent ces sables sont supérieurs à 200 microns, mais leur taille varie beaucoup selon la station d'épuration (site internet ADEME ; Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009).

Disponibilité

Importance du gisement (tonnage produit par an)

Les données disponibles relatives au gisement de refus de dessablage des eaux usées sont les suivantes :

- 1,45 kg/équivalent habitant/an (Ministère de l'environnement du Luxembourg, 2006) ;
- 8 à 15 L/équivalent habitant/an ou 0,1 à 0,3 l/m3 d'eau traitée (Canler et Perret, 2004) ;
- 4 à 8 L/équivalent habitant/an (Pronost et al., 2002) ;
- 12 kg MS/équivalent habitant/an, soit 5 à 8 L/équivalent habitant/an pour un dessableur-dégraisseur aéré (Canler et Perret, 2004) ;
- 20 à 40 kg/équivalent habitant/an (bibliographie préliminaire).

Variabilité de la production dans le temps

Peut variable dans le temps. Vraisemblablement dépendant de la pluviométrie.

Répartition du gisement sur le territoire Français

Répartition du gisement sur tout le territoire français.

Existence de filières de valorisation et importance de ces filières

Les sables issus des dessableurs sont (Canler et Perret, 2004 ; Guide sous-produits, 2007) :

- Soit mis en décharge, et assimilés à des déchets ménagers ;
- Soit traités par lavage et classification afin qu'ils soient réutilisés dans les travaux publics notamment (remblais). On distingue :

- des unités visant à éliminer l'eau contenue dans ces matières :
- des unités plus complexes, qui augmentent la siccité et améliorent la qualité des sables afin de permettre leur valorisation.

Provenance urbaine du déchet

Ces déchets sont issus du traitement des eaux usées urbaines.

Cadre / Statut réglementaire

Non recherché.

Caractéristiques générales des matériaux

Composition

Les refus de dessablage sont constitués de sables, de pépins (citron, tomates…), d'éclats de verre, etc. (Guide sous-produits, 2007).

Humidité/matière sèche, Fraction organique / Fraction minérale / Teneur en matière organique, Granulométrie/texture, Densité, Porosité, Couleur

Humidité / Matière sèche et densité :
Les matériaux récupérés dans les dessableurs contiennent en moyenne 30 à 40 % de matière sèche, dont 50 à 60 % de matières volatiles. Leur humidité est donc de 60 à 70 % (Guide sous-produits, 2007).
La pluviométrie améliore la siccité en raison de l'apport d'une fraction minérale plus élevée (Canler et Perret, 2004).

Paramètre d'état	Valeur	Référence
Matière Sèche en % (105°C selon ISO 11 465)	93,4 %	documents fournis par Mr BENOIT, station d'épuration de La Riche (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009)
Teneur en eau naturelle Wn en % (NF P 94 050)	10,5	
Masse volumique apparente à Wn	1,780	
Masse volumique sèche à Wn	1,61	

Remarque : la première ligne est issue d'un bordereau d'analyse différent des autres lignes.

Les données sont donc très divergentes. L'hétérogénéité des données collectées s'explique probablement par le traitement que subissent (ou non) les refus de dessablage récupérés.
Fraction organique / Fraction minérale :
Les sables extraits des déssableurs contiennent encore une proportion élevée de matières organiques (pouvant atteindre 50 %) liées à leur adsorption sur les matières minérales avant leur décantation. Ce taux peut être diminué à 30 %, voire moins, par un lavage poussé (Canler et Perret, 2004).
Des données sur les refus de prétraitement compact sont également disponibles (Canler et Perret, 2004) :

	en période de temps sec	temps de pluie
matières organiques	89 %, dont 4 à 5 % de lipides	49 %, dont 4 à 5 % de lipides
matières minérales	11 % dont 7 à 8 % de sables	51 %, dont 37 % sont des sables

Le taux de matière organique dans les refus de prétraitement est variable et susceptibles d'être élevé.
Granulométrie :
Le dimensionnement des dessableurs équipant les stations d'épuration doit permettre de retenir 80 % des sables de diamètre supérieur à 200 µm (Canler et Perret, 2004). Pronost et al. (2002) indiquent que 90% des particules de taille supérieure ou égale à 200 µm (sables) doivent être éliminées dans le dessableur.
Ainsi, les matières minérales de granulométrie inférieure à 200 µm doivent être maintenues en suspension par des puissances spécifiques de brassage suffisantes afin d'éviter leur dépôt dans les ouvrages. La figure suivante représente la répartition granulométrique des sables retenus par un dessableur (Canler et Perret, 2004) :



Granulométrie des sables issus d'un dessableur

Sur la base de cette courbe, les quantités de sables retenus, de granulométrie supérieure à 200 µm, se répartissent de la façon suivante :

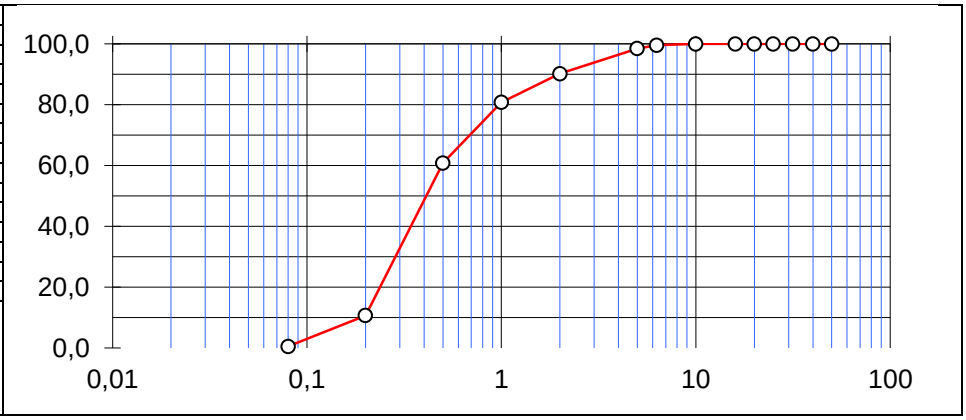
- 200 µm < Sable grossier < 2 mm : 60 %
- Gravier + Caillou + Pierre + Bloc > 2 mm : 40 %

Ces valeurs sont à prendre avec beaucoup de précautions et sont données uniquement à titre d'information.
En ce qui concerne les refus des prétraitements compacts, la répartition granulométrique suivante est obtenue (Canler et Perret, 2004) :

- 20 % de refus ont une granulométrie supérieure à 2 cm ;
- 67 % de refus sont compris entre de 1 mm à 20 mm ;
- 13 % de refus ont une granulométrie comprise entre 600 µm et 1 mm.

Ces résultats sont obtenus en période de temps sec. Par temps de pluie, la proportion est différente avec une augmentation de la fraction supérieure à 20 mm (36 % de la MS > à 20 mm). Ces résultats ne semblent pas extrapolables aux refus de dessablage.
Des résultats d'analyse granulométrique de sables issus de la décantation des eaux usées de la station d'épuration de La Riche sont présentés dans le Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest (Carrillo et al., 2009). Ils sont repris ci-dessous :

TAMISATS	
tamis(mm)	passant (%)
50	100,0
40	100,0
31,5	100,0
25	100,0
20	100,0
16	100,0
10	100,0
6,3	99,6
5	98,5
2	90,2
1	80,8
0,5	60,8
0,2	10,6
0,08	0,5



Extrapolation de cette analyse granulométrique :

- Argile < 2 µm : 0 %
- 2 µm < Limon < 50 µm : 0 %
- 50 µm < Sable fin < 200 µm : 10,6 %
- 200 µm < Sable grossier < 2 mm : 79,6 %
- 2 mm < Gravier < 2 cm : 9,8 %
- 2 cm < Caillou < 5 cm : 0 %
- 5 cm < Pierre < 20 cm : 0 %
- Bloc > 20 cm : 0 %

Caractéristiques de dangerosité des matériaux (présence de substances, impacts)

Teneurs en substances chimiques

Aucune donnée n'a été retrouvée dans la bibliographie.

A priori, la présence de substances dangereuses dans les refus de dessablage dépend de la nature des activités raccordées.

Percolation/Lixiviation

Des résultats d'analyse de sables issus de la décantation des eaux usées de la station d'épuration de La Riche sont présentés dans le Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest (Carrillo et al., 2009). Ces résultats portent sur certains paramètres mesurés sur éluat, après 3 lixiviations successives selon la norme NF X 31-210. La mise en contact a été réalisée sur un agitateur à plateau, pendant 3 fois 16 heures, en mettant en présence 101,59 g d'échantillon avec 1,016 L d'eau. La fraction soluble à l'issue de la 1ère élution était de 0,2 %, à l'issue de la 2ème 0,1 % et de la 3ème 0,1 %, la fraction soluble totale à la fin de l'essai étant de 0,3%.
Les autres résultats sont repris ci-dessous :

Constituant	Concentration dans l'éluat mg / L	Fraction soluble sur la matière sèche mg / kg
Première lixiviation		
Mercure	T< 0,001	T< 0,01
Plomb	T< 0,005	T< 0,05
Cadmium	T< 0,001	T< 0,01
Arsenic	T< 0,005	T< 0,05
Chrome hexavalent	T< 0,05	T< 0,54
Sulfates	47,18	505
COT	15,43	165,1
Deuxième lixiviation		
Mercure	T< 0,001	T< 0,01
Plomb	T< 0,005	T< 0,05
Cadmium	T< 0,001	T< 0,01
Arsenic	T< 0,005	T< 0,05
Chrome hexavalent	T< 0,05	T< 0,54
Sulfates	6,68	43,4
COT	4,47	40,2
Troisième lixiviation		
Mercure	T< 0,001	T< 0,01
Plomb	T< 0,005	T< 0,05
Cadmium	T< 0,001	T< 0,01
Arsenic	T< 0,005	T< 0,05
Chrome hexavalent	T< 0,05	T< 0,54
Sulfates	10,51	116,2
COT	2,73	27,5
Résultat global		
Mercure		T< 0,01
Plomb		T< 0,05
Cadmium		T< 0,01
Arsenic		T< 0,05
Chrome hexavalent		T< 0,54
Sulfates		664,6
COT		232,9

Fraction soluble : *Fraction soluble définie comme la quantité solubilisée rapportée à la masse de l'échantillon pour essai (sur brut ou sur sec)*

Hétérogénéité des matériaux

Ce matériau est très hétérogène en termes de qualité (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009). Celle-ci varie beaucoup d'une station d'épuration à l'autre, selon les types d'usines à proximité de la station (présence d'éléments très polluants…).

Données d'écotoxicité et de toxicité

Des risques sanitaires de nature biologique, résultant de la présence de micro-organismes pathogènes dans les refus de dessablage, peuvent être suspectés. Dans traitement d'usine de potabilisation, il est estimé que les opérations de dégrillage-dessablage éliminent 10 à 20 % des coliformes et 0 à 10 % des Salmonelles des eaux (Dubreil, 2001). Par analogie entre les usines de potabilisation et les stations d'épuration, il est probable qu'une partie des micro-organismes pathogènes présents dans les eaux usées en entrée de STEP se retrouvent donc dans les refus de dessablage.

Caractéristiques strictement agronomiques des matériaux

Aucune donnée n'a été retrouvée dans la bibliographie.
Couleur : probablement variable.

Caractéristiques strictement mécaniques des matériaux

Des résultats suivants d'analyse de sables issus de la décantation des eaux usées de la station d'épuration de La Riche sont présentés dans le Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest (Carrillo et al., 2009).

Paramètre d'état	Valeur	Référence
Indice Portant Immédiat - IPI (NF P 94 078)	1,18	documents fournis par Mr BENOIT, station d'épuration de La Riche (Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest - Carrillo et al., 2009)
VBS en g de bleu/100g de sol (NF P 94 068)	0,03	

Compte tenu de la valeur en bleu du sol (VBS) et du passant à 80 µm, ce matériau est insensible à l'eau.

Bibliographie :

Site internet ADEME : http://www.ademe.fr/partenaires/boues/pages/f14.htm
Canler J-P., Perret J-M. (2004) Étude des pré-traitements compacts basés uniquement sur le tamisage fin - Cas du traitement des eaux résiduaires urbaines ou domestiques, FNDAE n°28, Document technique, Cemagref, Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires rurales.
Carrillo L., Emile F., Castaldi G., Perrin B. et Wagner C. (2009). Matériaux minéraux potentiellement utilisables en espaces verts : matériaux alternatifs pour les mélanges Terre-Pierre établis à partir de la classification européenne des déchets. Mémoire Plante et Cité / Agrocampus Ouest.
Dubreil J. (2001) Réflexion sur la notion d'indicateur de risques sanitaires liés au rejet d'eaux usées en milieu littoral, Mémoire IGS de l'Ecole Nationale de la Santé Publique.
Guide de la réception et de la valorisation des sous-produits de l'assainissement (2007) Document de travail, Version 9 (juillet 2007).
Pronost J., Pronost R., Deplat L., Malrieu J. et Berland J-M. (2002) Stations d'épuration : dispositions constructives pour améliorer leur fonctionnement et faciliter leur exploitation, FNDAE N° 22 bis, Document technique, Office International de l'Eau, CNFME / SNIDE, Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires rurales.
Ministère de l'environnement du Luxembourg (2006) Plan Général de Gestion des Déchets, document pour l'atelier : Déchets STEP du 23/11/2006.

Muriel TAUVERON – ASCOMADE 2010

Les produits de curage de réseau

Comme pour les sables, les produits issus du curage des réseaux sont caractérisés par une composition très hétérogène, ce qui rend leur traitement délicat. Cette hétérogénéité se traduit par la présence en quantité variable de sables, d'encombrants et graviers, de boues, mais aussi d'une forte teneur en eau (environ 60 à 70% du produit).
Toutefois, les matières de curage perdent en moyenne 45% de leur volume une fois égouttées.

Origine	Composants	Teneur en MS
Curage réseaux	Sédiments des réseaux avec des macro déchets : boites alu…	60 à 70% MS dont 10 à 15% de matières volatiles
Dessableurs	Sables récupérés avec pépins (citron, tomates…), éclats de verre…	30 à 40% MS dont 50 à 60% MV
Balayeuses	Sédiments des caniveaux, feuilles mortes, éclats de verres, marrons, mégots, papier, aluminium…	60 à 80% MS dont 10 à 15% MV

Tableau 2 : Composition des sables et matères de curage en fonction de leur origine (Essais Sogéa-Station de Douai, 1996)

Mémoire EHESP :

Tableau II : Bilan des caractéristiques granulométriques des sous-produits d'assainissement pluvial

Granulométrie en mm	d<5	d<2	d<1	d<0,4	d<0,2	d<0,1	d<0,08	d10	d50
Provenance des sous-produits	% massiques cumulés								
Avaloirs	85 - 90	67 - 81	57 - 71	31 - 43	15 - 16	10 - 11,0	9 - 10,0	0,08 - 0,3	0,5 - 0,85
Bassins décantation		98,9	97,4	71,6	29,3	13,1	10,2		
Voiries centre-ville	85 - 98	54 - 86	39 - 74	21 - 38	9 - 12,0	4 - 7,0	3 - 6,0	0,2	0,75
Voiries zone résidentielle	88 - 100	68 - 83	54 - 69	6,0 - 39	6,0 - 16	6,0 - 10	5,0 - 9	0,15	0,72
Voiries chaussée	84 - 91	66 - 85	54 - 77	25 - 48	11,0 - 21	6,0 - 10	5,0 - 9	0,11	0,69
Dessableurs STEP	82	59	48	23	4	2	2	0,27	1,2
Collecteurs séparatifs EP	66	46	38	17	2	0	0		2,25
Collecteurs séparatifs EU	> 69,8	63,4	58,4	30,14	7				

Site internet OFRIR :

Le Tableau 4 présente les concentrations en métaux lourds et hydrocarbures totaux rencontrées dans les boues de curage de réseaux. La comparaison de ces valeurs avec les concentrations en métaux lourds mesurées dans les boues de bassins de retenue (Tab. 2) montre que dans les deux cas les teneurs sont comparables et élevées. Les concentrations en Cu sont plus fortes dans les boues de curage de réseau. La teneur en Zn atteint 4 040 mg kg^{-1} dans les dépôts du Marais à Paris (toitures en zinc). Les teneurs en hydrocarbures totaux sont très variables mais du même ordre de grandeur que celles rencontrées dans les boues de bassins

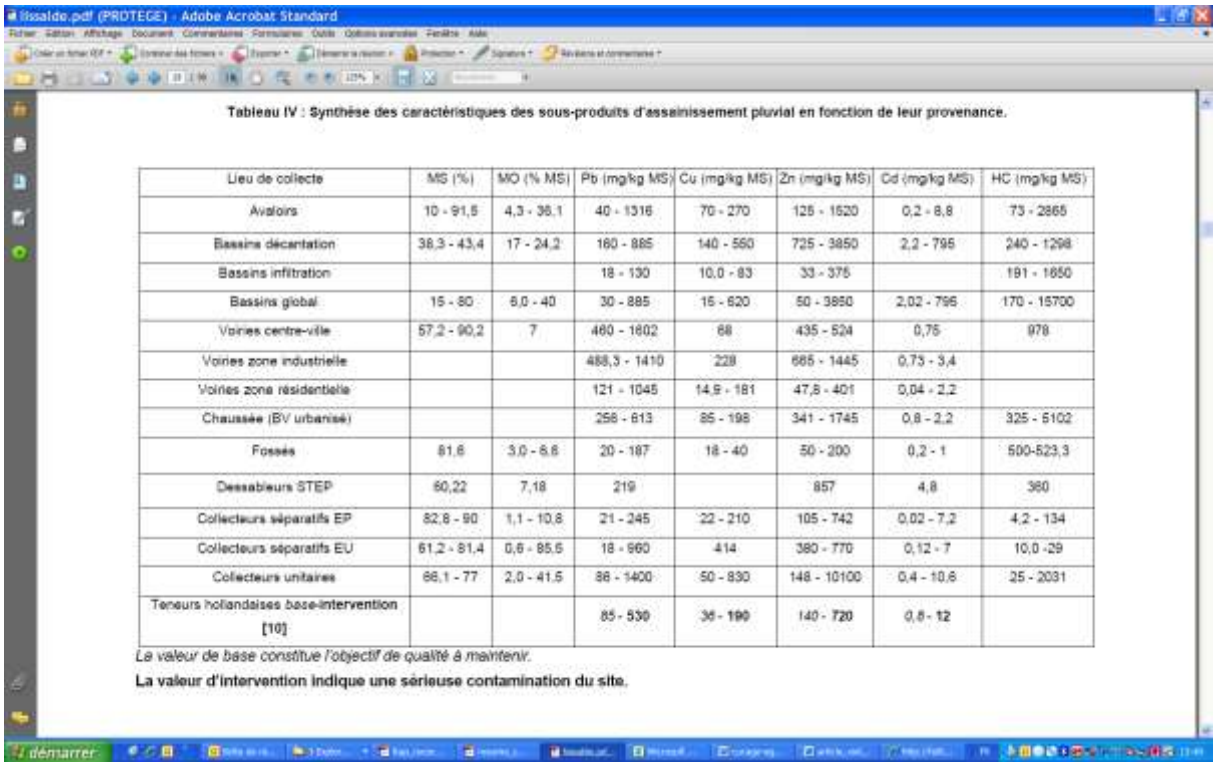
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
HCT (mg kg^{-1})	4207	-	-	-	886	3385	15700	-
Cd (mg kg^{-1})	12	4	4	4	9	5	16	4
Cr (mg kg^{-1})	77	42	50	40	63	47	73	-
Cu (mg kg^{-1})	191	260	530	131	300	114	426	870
Ni (mg kg^{-1})	48	37	26	35	45	25	35	-
Pb (mg kg^{-1})	396	487	221	232	2250	483	301	1870
Zn (mg kg^{-1})	951	911	1076	1048	1027	394	641	4040
Hg (mg kg^{-1})	2	11	5	1	2	3	5	-

Tab. 4. Caractérisation de boues d'assainissement (d'après AGHTM, 1994).

HCT :hydrocarbures totaux

1- réseaux unitaires agglomérations parisienne et marseillaise
2- réseau eaux usées agglomération marseillaise
3- prétraitement stations d'épuration

Mémoire EHESP :



Tissalde.pdf (PROTEGE) - Adobe Acrobat Standard

Tableau IV : Synthèse des caractéristiques des sous-produits d'assainissement pluvial en fonction de leur provenance.

Lieu de collecte	MS (%)	MO (% MS)	Pb (mg/kg MS)	Cu (mg/kg MS)	Zn (mg/kg MS)	Cd (mg/kg MS)	HC (mg/kg MS)
Avaloirs	10 - 91,5	4,3 - 36,1	40 - 1516	70 - 270	125 - 1520	0,2 - 8,8	73 - 2865
Bassins décantation	38,3 - 43,4	17 - 24,2	160 - 885	140 - 550	725 - 3850	2,2 - 795	240 - 1298
Bassins infiltration			18 - 130	10,0 - 83	33 - 375		191 - 1650
Bassins global	15 - 80	6,0 - 40	30 - 885	15 - 620	50 - 3850	2,02 - 795	170 - 15700
Voiries centre-ville	57,2 - 90,2	7	460 - 1602	68	435 - 524	0,75	978
Voiries zone industrielle			488,3 - 1410	228	665 - 1445	0,73 - 3,4	
Voiries zone résidentielle			121 - 1045	14,9 - 181	47,8 - 401	0,04 - 2,2	
Chaussée (BV urbanisé)			258 - 613	85 - 198	341 - 1745	0,8 - 2,2	325 - 5102
Fossés	81,6	3,0 - 8,6	20 - 187	18 - 40	50 - 200	0,2 - 1	500-523,3
Dessableurs STEP	60,22	7,18	219		857	4,8	360
Collecteurs séparatifs EP	82,8 - 90	1,1 - 10,8	21 - 245	22 - 210	105 - 742	0,02 - 7,2	4,2 - 134
Collecteurs séparatifs EU	61,2 - 81,4	0,6 - 85,5	18 - 960	414	380 - 770	0,12 - 7	10,0 -29
Collecteurs unitaires	66,1 - 77	2,0 - 41,5	86 - 1400	50 - 830	148 - 10100	0,4 - 10,6	25 - 2031
Teneurs hollandaises *base-intervention* [10]			85 - 530	36 - 190	140 - 720	0,8 - 12	

La valeur de base constitue l'objectif de qualité à maintenir.

La valeur d'intervention indique une sérieuse contamination du site.

Déchets municipaux de jardins (biodégradables) : 20-02-01

Déchets de tissus végétaux : 02-01-03

20 02 01	déchets biodégradables	Déchets de jardins et de parcs (y compris les déchets de cimetière) :	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations) y compris les fractions collectées séparément
02 01 03	déchets de tissus végétaux	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche :	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments

La **catégorie 20 02 01** du Catalogue Européen des Déchets désigne des **déchets biodégradables issus de l'entretien de jardins et parcs**. Il s'agit donc en majeure partie des déchets végétaux issus de tailles et de tontes.

La **catégorie 02 01 03** fait quant à elle référence à des **déchets de tissus végétaux issus notamment de l'agriculture, de l'horticulture**, et donc impropres à tout usage dans ces secteurs.

On fera ici différentes hypothèses :

- On suppose que les déchets végétaux évoqués ci-dessus sont **relativement similaires**. Ils seront associés, au sein de cette fiche, sous l'appellation générique de « **déchets verts** ». Une forte variabilité existe au sein des végétaux qui constituent chacune de ces deux catégories, une certaine hétérogénéité existera donc au sein des déchets verts. Il est de ce fait difficile de fournir une « carte d'identité » de ces déchets, qui dépendent de la proportion en mélange des espèces végétales dont ils sont issus, ainsi que d'un état physico-chimique variable (broyage, déchiquètement, déshydratation, décomposition…).
- On acceptera également que ces déchets verts sont **en certains points assimilables à du compost**, si tant est que celui-ci se trouve en **tout début du processus de compostage** (les déchets verts broyés constituent un des matériaux de base entrant dans la composition du compost). Des différences existent, puisque le compost fait souvent également intervenir des sous-produits animaux. Du fait du peu d'informations disponibles pour la caractérisation de déchets verts, certains paramètres pourront néanmoins être approchés par une analogie avec le compost.

Le site de l'ADEME fournit une description qualitative plus précise des déchets verts : il s'agit de déchets organiques formés de résidus issus de l'entretien des espaces verts, des zones récréatives, des jardins privés, des serres, des terrains de sports etc. On désigne par déchet vert les feuilles mortes, les tontes de gazon, les tailles de haies et d'arbustes, les résidus d'élagage, les déchets d'entretien de massifs, les déchets de jardin des particuliers collectés séparément ou par le biais des déchetteries.
Ils proviennent des collectivités locales, des organismes publics ou para-publics (HLM, universités…), des sociétés privées d'entretien des espaces verts, d'entreprises privées…

[Source : site de l'ADEME ; http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?catid=14732]

Des analyses (ponctuelles) réalisées sur broyats de déchets verts indiquent que le produit brut contient environ 43% d'humidité, et donc 57% de matière sèche. La matière minérale représente environ 12% du produit brut, et la matière organique en représente 45%.

[Source : analyse de broyat de déchets verts fournie Valterra, Laboratoire SAS, 2011]

Caractéristiques physiques des matériaux

Portance

Aucune valeur de ce paramètre n'a été trouvée.

On peut supposer que cette valeur dépendra de l'état des déchets verts (broyage, déchiquètement, déshydratation, décomposition…). Une fourchette qualitative allant de « Faible » à « Moyenne » sera donc retenue afin de prendre en considération cette variabilité.

Portance	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Forte

Conductivité des lixiviats

Aucune valeur de ce paramètre n'a pu être trouvée.

Densité apparente

Aucune valeur n'a été relevée.
Le SETOM (Syndicat Etudes Traitements Ordures Ménagères) fournit cependant des valeurs de densité de différents matériaux :

- Branches et tailles foisonnantes : 0,08 à 0,12
- Branches et tailles broyées : 0,30 à 0,35
- Petites tailles : 0,15 à 0,20
- Tontes de gazon : 0,30 à 0,60
- Feuilles : 0,20 à 0,25

La fourchette moyenne des densités fournies ci-dessus est de 0,21 à 0,30 environ.
[Source : Le compostage de déchets verts au SETOM dossier technique, SETOM, date inconnue]

Perméabilité à l'eau

Aucune estimation quantitative n'a pu être trouvée.

Néanmoins, et pour rester en cohérence avec la fiche matériau établie sur le compost, on retiendra ici l'appréciation qualitative de « **perméable** ». En effet, le compost a été considéré comme appartenant à cette catégorie, alors qu'il présente un espacement des composants individuels nécessairement inférieur ou égal à celui de déchets verts, plus grossiers.

Perméabilité à l'eau		
Gamme	**Appréciation quantitative Ks (m/s)**	**Appréciation qualitative**
0	$10^{-2} \leq Ks < 10^{-4}$	Perméable
1	$10^{-4} \leq Ks < 10^{-7}$	Semi perméable
2	$10^{-7} \leq Ks < 10^{-10}$	Imperméable
3	$Ks \geq 10^{-10}$	Très imperméable

Structure (agrégation)

Aucune agrégation n'aura lieu a priori, du fait de la taille des éléments composant le compost.

Structure	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Bonne

Granulométrie

Selon toute vraisemblance, la catégorie granulométrique à retenir sera « grossier », car les déchets verts sont constitués de macroéléments.

Granulométrie		
Gamme	**Appréciation quantitative**	**Appréciation qualitative**

	Taille de particules	
0	T < 2 µm	Argileux
1	2 ≤ T < 50 µm	Limoneux
2	50 ≤ T < 2 mm	Sableux
3	T ≥ 2 mm	Grossier

Caractéristiques agronomiques des matériaux

pH

Des analyses réalisées sur broyats de déchets verts donnent un **pH de 7,6.**

Il serait néanmoins pertinent d'obtenir d'autres analyses de laboratoire, qui permettront d'établir des moyennes.

[Source : analyse de broyat de déchets verts fournie Valterra, Laboratoire SAS, 2011]

pH		
Gamme	**Appréciation quantitative Valeurs de pH**	**Appréciation qualitative**
0	pH < 5	Acide
1	5 ≤ pH < 6,5	Acide/neutre
2	6,5 ≤ pH < 7,5	Neutre
3	pH ≥ 7,5	Basique

$CaCO_3$ total

A priori, le carbonate de calcium est peu présent dans végétaux.

Carbonatation		
Gamme	**Appréciation quantitative Pourcentage de $CaCO_3$**	**Appréciation qualitative**
0	0%	Absente
1	0≤ $CaCO_3$ < 1 %	Faible
2	1 ≤ $CaCO_3$< 10 %	Moyenne
3	$CaCO_3$ ≥ 10 %	Importante

N total

La teneur en N total des déchets verts représente 12 kg/t-MS (source ADEME).

Carbone organique

Le carbone organique représente 39,44% de la MS, qui représente elle-même environ 57% du produit brut.

Ainsi, le carbone organique représente environ 22% du produit brut.

[Source : analyse de broyat de déchets verts fournie Valterra, Laboratoire SAS, 2011]

CEC

Ce paramètre n'a pas pu être déterminé.

P assimilable

Une analyse ponctuelle de broyat de déchets verts donne une teneur de P_2O_5 d'environ **1,7 g/kg** sur produit brut.
Le potentiel de fertilisation phosphatée des déchets verts est important.
[Source : analyse de broyat de déchets verts fournie Valterra, Laboratoire SAS, 2011]

P assimilable		
Gamme	**Appréciation quantitative P assimilable (g/kg) préciser méthode d'extraction**	**Appréciation qualitative de la fertilité phosphatée**
0	P < 0,04	Très faible
1	0,04 ≤ P < 0,08	Médiocre
2	0,08 ≤ P < 0,12	Normale/correcte
3	P ≥ 0,12	Elevée

Caractéristiques de dangerosité des matériaux

pH sur éluat

Une mesure sur broyats de déchets verts, effectuée selon norme NF ISO 10390 donc une valeur de **pH KCl** égale à **7,11.**

[Source : analyse de broyat de déchets verts fournie Valterra, Laboratoire SAS, 2011]

Teneur ou concentration totale en polluants

Les seuls polluants susceptibles de se trouver dans ces matériaux semblent soit être de **nature phytosanitaire,** soit **correspondre à des engrais**.

Disponibilité des polluants

La disponibilité des pesticides et engrais dépend des molécules en présence, qui sont variées. Elles peuvent se dégrader en divers composés intermédiaires aux comportements également variables. Il existe des possibilités d'adsorption, de minéralisation, ou au contraire de forte mobilité selon l'hydrophilie et la taille de la molécule considérée.

Il est donc impossible de donner un profil de disponibilité général pour les engrais et pesticides.

Disponibilité des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	Très faible/négligeable
2	Possible en différé
3	Possible en immédiat

Bibliographie

Ouvrages documents et articles publiés :

- [Source : Le compostage de déchets verts au SETOM dossier technique, SETOM, date inconnue]

Liens internet :

- [Source : site de l'ADEME ; http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?catid=14732]

Bulletins d'analyse obtenus dans le cadre du projet:

- [Source : analyse de broyat de déchets verts fournie Valterra, Laboratoire SAS, 2011]

Déchets de nettoyage des rues : 20-03-03

20-03-03	Déchets de nettoyage des rues	Autres déchets municipaux :	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations) y compris les fractions collectées séparément :

Les déchets de nettoyage des rues proviennent du balayage mécanique ou manuel, des bornes de propreté et du lavage des rues.

Les déchets de balayage proviennent de l'entretien courant des chaussées qui a pour objectif de maintenir la sécurité des usagers (par exemple, éviter la projection des gravillons, éviter des problèmes de tenue de route des motocyclistes). Les déchets collectés lors de ces opérations de balayage sont composés de **gravillons, poussières, huiles et divers petits déchets**.
Le balayage des chaussées consiste à les débarrasser des divers objets susceptibles de gêner la circulation des usagers, composés essentiellement des **granulats arrachés au revêtement ou aux accotements mal stabilisés**. Le balayage est effectué de façon manuelle et/ou mécanique par le gestionnaire de voirie concernée.
Les produits de balayage de chaussée sont de taille et de nature variée. **La fraction la plus grossière, aisément récupérée par balayage, est constituée de canettes, capsules, mégots, débris végétaux, papiers.** Cette fraction ne sera pas détaillée ici, mais pourrait faire l'objet d'une étude plus approfondie, éventuellement basée sur la distribution relative du déchet considéré dans son ensemble en chacune de ces catégories individuelles.

Caractéristiques physiques des matériaux

Portance

Aucune donnée bibliographique sur la portance des matériaux de balayage/nettoyage des rues n'a été retrouvée.

Conclusion :

La portance de ces matériaux est considérée comme faible au regard de leur composition (il s'agit majoritairement de granulats arrachés au revêtement ou aux accotements auxquels s'ajoutent divers débris grossiers : canettes, capsules, mégots, débris végétaux, papiers, etc.).

Portance	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Forte

Conductivité des lixiviats

Aucune donnée bibliographique sur la conductivité des lixiviats n'a été retrouvée. De même, aucune analyse sur lixiviat des cations et anions majeurs ne semble disponible.
Les seules données disponibles concernent les sables issus du lavage des matériaux d'assainissement pluvial dont font partie / auxquels s'apparentent les matériaux de balayage/nettoyage des rues :

> Lissalde (2002) présente les résultats de l'analyse après lixiviation (100 g de matériau dans 1 L d'eau pendant 16h) de la fraction soluble sur ces sables. La fraction soluble varie de 0,14 % à 0,42 % en fonction des villes d'où sont issus ces matériaux.
> Ce résultat n'est pas directement convertible en conductivité des lixiviats mais permet tout de même, sous réserve d'hypothèses sur les ions présents, d'appréhender l'ordre de grandeur de ce paramètre : 1000 µS/cm.

Conclusion :

Les données bibliographiques disponibles ne concernent pas directement les matériaux de balayage/nettoyage des rues, mais les sables extraits d'un mélange de matériaux dont ils font partie / auxquels ils s'apparentent. Elles ne concernent pas non plus directement la conductivité des lixiviats, mais leur fraction soluble.
Néanmoins, sur la base de ces données, **une première approximation de la conductivité des lixiviats à 1000 µS/cm peut être proposée**.

Densité apparente

Aucune donnée trouvée.

Perméabilité à l'eau

Aucune donnée bibliographique relative à la perméabilité à l'eau de ces matériaux n'a été retrouvée. Toutefois, au regard de leur composition (il s'agit majoritairement de granulats arrachés au revêtement ou aux accotements) et de leur granulométrie (sableuse, comportant une fraction limoneuse), la perméabilité des matériaux de balayage et curage des rues peut être estimée comprise entre 10^{-4}-10^{-7} m/s.

Conclusion :

Perméabilité à l'eau		
Gamme	**Appréciation quantitative Ks (m/s)**	**Appréciation qualitative**
0	$10^{-2} \leq Ks < 10^{-4}$	Perméable
1	$10^{-4} \leq Ks < 10^{-7}$	Semi perméable
2	$10^{-7} \leq Ks < 10^{-10}$	Imperméable
3	$Ks \geq 10^{-10}$	Très imperméable

Structure (agrégation)

Aucune donnée bibliographique relative à l'agrégation de ces matériaux n'a été retrouvée. Néanmoins, au vu de la nature des déchets assemblés dans cette catégorie, on peut prédire qu'il y a peu de chances que des structures d'agrégation se créent.

Structure	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Bonne

Granulométrie

Données bibliographiques relatives à la granulométrie :

La récupération de la fraction la plus fine nécessite l'intervention de balayeuses aspiratrices. Néanmoins, le résultat du balayage n'est pas toujours considéré comme performant. Hamilton *et al* (1984) estiment également que seule la fraction > 250 µm est récupérée, la fraction la plus fine qui est aussi la plus polluée, restant piégée dans la structure routière. Cependant, les nouvelles techniques d'aspiration semblent plus performantes (site internet OFRIR). Enfin, l'entretien courant comprend également le décolmatage d'enrobés drainants ainsi que la récupération de résidus de grenaillage ou d'hydrorégénération des chaussées.
Les analyses physiques ont montré que les produits bruts de balayage de chaussées avant élaboration sont principalement constitués de quartz et de feldspath (issus du bassin versant). En parallèle, certains de ces produits bruts ont été caractérisés en granulométrie laser d'après Durand (2003), ils ont une granulométrie grossière avec un D50 et un D90 respectivement de l'ordre de 268,5 µm et 955,7 µm en moyenne (campagne de prélèvements de février) et de 493,9 µm et 1383,6 µm (campagne de prélèvements de septembre).
Les sédiments des produits de balayage de chaussées sont assez grossiers, avec une texture à dominante limono-argilo-sableuse ou limono-argileuse (Durand, 2003).
La revue bibliographique effectuée par Lissalde (2002) sur les caractéristiques des sous-produits de l'assainissement (cf. tableau ci-dessous) confirme la texture grossière de ces matériaux.

Granulométrie en mm	d<5	d<2	d<1	d<0,4	d<0,2	d<0,1	d<0,08	d10	d50
Provenance des sous-produits	% massiques cumulés								
Voiries centre-ville	85 - 98	54 - 86	39 - 74	21 - 38	9 - 12,0	4 - 7,0	3 - 6,0	0,2	0,75
Voiries zone résidentielle	88 - 100	68 - 83	54 - 69	6,0 - 39	6,0 - 16	6,0 - 10	5,0 - 9	0,15	0,72
Voiries chaussée	84 - 91	66 - 85	54 - 77	25 - 48	11,0 - 21	6,0 - 10	5,0 - 9	0,11	0,69

Granulométrie des résidus de balayage/nettoyage des rues (Lissalde, 2002)

Conclusion :

Au regard de l'ensemble de ces informations, la granulométrie moyenne des résidus de balayage/nettoyage des rues est estimée sableuse.

Granulométrie		
Gamme	**Appréciation quantitative Taille de particules**	**Appréciation qualitative**
0	T < 2 µm	Argileux
1	2 ≤ T < 50 µm	Limoneux
2	50 ≤ T < 2 mm	Sableux
3	T ≥ 2 mm	Grossier

Caractéristiques agronomiques des matériaux

pH

Données bibliographiques relatives au pH :

Les données relatives aux caractéristiques physico-chimiques des déchets de balayage des rues disponibles sur le site internet OFRIR indiquent un pH basique.

Conclusion :

pH		
Gamme	**Appréciation quantitative Valeurs de pH**	**Appréciation qualitative**
0	pH < 5	Acide
1	5 ≤ pH < 6,5	Acide/neutre
2	6,5 ≤ pH < 7,5	Neutre
3	pH ≥ 7,5	Basique

$CaCO_3$ total

Données bibliographiques relatives au $CaCO_3$:

Les sous-produits issus du balayage/nettoyage des rues comportent de la **calcite ($CaCO_3$)**, des chlorites et du verre non minéral (bouteille de verre) (Durand, 2003).

Conclusion :

Les informations disponibles indiquent la présence de calcite mais n'en précisent pas les proportions.

N total

Aucune donnée bibliographique retrouvée.

Carbone organique

Aucune donnée bibliographique relative au carbone organique n'a été retrouvée. En revanche, les teneurs en matières organiques et minérales sont documentées.

Le pourcentage de MO des déchets de balayage des rues n'est pas élevé, il est inférieur à 4,2 % (site internet OFRIR).

La revue bibliographique effectuée par Lissalde (2002) sur les caractéristiques des matériaux de balayage/nettoyage des rues a permis d'identifier des valeurs de teneur en MO uniquement pour les voiries de centre-ville (cf. tableau ci-dessous). La représentativité de ces **données est donc faible.**

	Teneur en matière sèche (%)	Teneur en MO (% MS)
Voiries centre-ville	57,2 – 90,2	7

Caractéristiques des matériaux de balayage/nettoyage des rues (Lissalde, 2002)

Conclusion :
Les données bibliographiques disponibles indiquent une teneur en MO de l'ordre de quelques pourcents dans les résidus de balayage/nettoyage des rues. Considérant un ratio théorique de la teneur en MO sur la teneur en carbone organique de 2, **la teneur en carbone organique est estimée de l'ordre de 2 à 3 %.**

CEC

Aucune donnée bibliographique relative à la CEC n'a été retrouvée.

P assimilable

Aucune donnée bibliographique retrouvée.

Au regard de la composition des résidus balayage/nettoyage des réseaux (faible teneur en MO), la teneur en P assimilable est probablement médiocre.

Conclusion :

P assimilable		
Gamme	**Appréciation quantitative P assimilable (g/kg) préciser méthode d'extraction**	**Appréciation qualitative de la fertilité phosphatée**
0	P < 0,04	Très faible
1	0,04 ≤ P < 0,08	Médiocre
2	0,08 ≤ P < 0,12	Normale/correcte
3	P ≥ 0,12	Elevée

Caractéristiques de dangerosité des matériaux

pH sur éluat

Aucune donnée bibliographique de pH sur lixiviat spécifique aux matériaux de balayage/nettoyage des rues n'a été retrouvée.

En revanche, des mesures de pH sur lixiviat ont été effectuées sur des sables, obtenus après lavage d'un mélange de matériaux issus de l'assainissement des eaux pluviales de la ville de Limoge. Les résultats indiquent des valeurs de 7,5-8 (Lissalde, 2002).

Conclusion :

S'agissant de la seule donnée disponible, **la valeur intermédiaire de 7,7 unités pH est retenue** comme caractéristique des matériaux de balayage/nettoyage des rues, bien que celle-ci porte (1) sur un mélange de sous-produits de l'assainissement et (2) sur des matériaux après lavage.

Teneur ou concentration totale en polluants

Données bibliographiques relatives à la teneur (ou concentration) totale en polluants :

Du fait de leur origine, **ces déchets de balayage sont fréquemment contaminés par les hydrocarbures et les métaux lourds** (SETRA, 2000). En effet, la revue bibliographique effectuée par Lissalde (2002) sur les caractéristiques des sous-produits de l'assainissement fournit les teneurs en polluants suivantes.

Lieu de collecte	MS (%)	MO (% MS)	Pb (mg/kg MS)	Cu (mg/kg MS)	Zn (mg/kg MS)	Cd (mg/kg MS)	HC (mg/kg MS)
Voiries centre-ville	57,2 - 90,2	7	460 - 1602	68	435 - 524	0,75	978
Voiries zone industrielle			488,3 - 1410	228	665 - 1445	0,73 - 3,4	
Voiries zone résidentielle			121 - 1045	14,9 - 181	47,8 - 401	0,04 - 2,2	
Chaussée (BV urbanisé)			256 - 613	85 - 198	341 - 1745	0,8 - 2,2	325 - 5102

Caractéristiques des matériaux de balayage/nettoyage des rues (Lissalde, 2002)

Les particules minérales de ces déchets fixent 83 à 92 % de la pollution totale en DCO, 82 à 99% des hydrocarbures totaux et 80 à 100 % de plomb (SETRA, 2000).

Conclusion :

Teneur/Concentration totale des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	En trace
2	Contamination possible
3	Contamination fréquente

Disponibilité des polluants

Aucune donnée bibliographique relative à la disponibilité des polluants n'a été retrouvée pour les matériaux balayage/nettoyage des rues.

En revanche, des tests de lixiviation ont été réalisés sur des sables issus de l'assainissement pluvial après lavage, dont font partie / auxquels s'apparentent les matériaux balayage/nettoyage des rues.

Domas et al. (2000, site internet OFRIR) ont réalisé des tests de lixiviation selon la norme NF X 31-210 sur des sables lavés issus du curage des réseaux d'eau pluviale. Des essais en cases lysimétriques de 1 m^3 sur ce même matériau préalablement compacté ont également été réalisés en simulant les pluies par arrosage régulier à l'aide d'eau déminéralisée. Les concentrations mesurées sur l'éluat des tests de lixiviation et sur les eaux de percolation dans les lysimètres sont comparables :

- concentrations en hydrocarbures totaux de l'ordre de 1 mg/L ;
- concentrations en HAP inférieures à 0,07 µg/L ;
- concentrations en sulfates et métaux lourds qui ne posent pas de problème, à l'exception de Pb et Hg qui montrent quelques valeurs élevées.

Conclusion :

Au regard des éléments suivants :

- teneurs en polluants significatives dans les matériaux de balayage/nettoyage des rues ;
- absence de donnée sur éluat relative aux matériaux de balayage/nettoyage des rues ;
- fraction lixiviable de certains polluants dans les sables obtenus après lavage de sous-produits de l'assainissement pluvial auxquels s'apparentant aux matériaux de balayage/nettoyage des rues ;

les transferts de polluants vers les eaux souterraines sont considérés comme possibles en immédiats.

Disponibilité des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	Très faible/négligeable
2	Possible en différé
3	Possible en immédiat

Remarque : Aucune donnée relative aux transferts sol plante n'a été identifiée dans la littérature.

Bibliographie

Durand C. (2003) Caractéristique physico-chimique des produits de l'assainissement pluvial. Origine et devenir des métaux traces et des polluants organiques, thèse, 213 p.
Hamilton R.S., Revitt D.M. et Waren R.S. (1984) Levels and physico-chemical associations of Cd, Cu, Pb and Zn in road sediments, The Sci. Total Environ., vol. 33, pp. 59-74.
SETRA (2000) Gestion des déchets de construction et d'exploitation liés à la route », Note d'information n° 63, Collection Economie, Environnement Conception.

Lissalde A.-M. (2002) Caractérisation, traitement et valorisation des sous-produits d'assainissement pluvial, Mémoire de fin d'étude IGS 2001-2002.

Site internet OFRIR : http://ofrir.lcpc.fr/portail_lcpc/html/accueil/accueil_articles_theme.php

Déchets provenant du nettoyage des égouts : 20-03-06

20 03 06	déchets provenant du nettoyage des égouts	Autres déchets municipaux :	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations) y compris les fractions collectées séparément :

Cette rubrique est susceptible d'inclure les boues de curage des réseaux d'eau usées et des réseaux d'eau pluviale.
Au cours de leur cheminement dans les réseaux d'assainissement, les eaux résiduaires urbaines et pluviales se débarrassent par sédimentation d'une partie des matières en suspension qu'elles charrient. Ces particules se déposent dans les réseaux qui doivent être régulièrement curés, afin d'éviter les risques de surcharges et les phénomènes de fermentation (Sogeti, 2004). Les résidus de curage de réseaux d'assainissement sont donc issus de l'entretien des réseaux d'assainissement et de leurs ouvrages associés : regard, poste de relèvement, etc.
Les produits issus du curage des réseaux sont caractérisés par une composition très hétérogène (Tauveron-Asconade, 2010). Cette hétérogénéité se traduit par la présence en quantité variable de sables, d'encombrants et graviers, de boues, mais aussi d'une forte teneur en eau (environ 60 à 70% du produit). Toutefois, les matières de curage perdent en moyenne 45% de leur volume une fois égouttées.

Caractéristiques physiques des matériaux

Portance

Aucune donnée bibliographique sur la portance des matériaux de curage n'a été retrouvée.
Cependant, des essais géotechniques ont été réalisés sur des sables issus du curage des réseaux d'eau pluviale après lavage (élimination des refus et des boues). Les résultats (cf. tableau ci-dessous) révèlent de bonnes caractéristiques géotechniques (Helaine, 2000).

Tamisat à 80 µm (NF P 18-560)	< 6%
Tamisat à 2 mm (NF P 18-560)	< 70%
Essai au bleu – VBS – NF P 18-592	< 0,2
Equivalent sable – NF P 18-598	75-85 %
Friabilité du sable – NF P 18-068	< 20 %
Optimum Proctor Normal	Densité sèche : 1,53 Teneur en eau : 21 %
Classement assimilable NF P 11-300	B1 – D1

Propriétés géotechniques du Valori'Sable (extrait de : Helaine, 2000)

Conclusion :

Bien que la fraction sableuse obtenue après traitement présente de bonnes caractéristiques géotechniques, la portance des matériaux de curage dans leur ensemble est considérée comme faible au regard de leur composition.

Portance	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Forte

Conductivité des lixiviats

Aucune donnée bibliographique sur la conductivité des lixiviats n'a été retrouvée. De même, aucune analyse sur lixiviat des cations et anions majeurs ne semble disponible.
Les seules données disponibles concernent les sables issus du curage des réseaux d'eau pluviale après lavage :

- Helaine (2000) fournit quelques résultats d'analyse sur éluats, après lixiviation sur des sables lavés par le procédé « Ecosable », parmi lesquels une teneur en sulfate sur éluat de 2145 mg/kg-MS.
- Lissalde (2002) présente les résultats de l'analyse après lixiviation (100 g de matériau dans 1 L d'eau pendant 16h) de la fraction soluble sur des sables obtenus par lavage des matériaux de curage des réseaux d'eau pluviale. La fraction soluble varie de 0,14 % à 0,42 % en fonction des villes d'où sont issus ces matériaux.

Ce résultat n'est pas directement convertible en conductivité des lixiviats mais permet tout de même, sous réserve d'hypothèses sur les ions présents, d'appréhender l'ordre de grandeur de ce paramètre : 1000 µS/cm.

Conclusion :

Les données bibliographiques disponibles ne concernent pas directement les résidus de curage, mais les sables issus du curage de ceux-ci. Elles ne concernent pas non plus directement la conductivité des lixiviats, mais leur fraction soluble.
Néanmoins, sur la base de ces données, **une première approximation de la conductivité des lixiviats à 1000 µS/cm peut être proposée**.

Densité apparente

Données bibliographiques relatives à la densité apparente :

Les sables issus du curage des réseaux d'eau pluviale (mesures effectuées en entrée de différentes installations de lavage) ont une densité variant de 1,2 à 1,6 (Lissalde, 2002).

Les essais Proctor réalisés sur des sables issus du curage des réseaux d'eau pluviale après lavage (élimination des refus et des boues) indiquent que la compacité de ce matériau est maximale pour une teneur en eau de 21%, sa densité étant alors de 1,53 (Helaine, 2000).

Conclusion :

Bien que la représentativité des données disponible soit faible, **la densité apparente retenue sur la base de ces données est de 1,4**.

Perméabilité à l'eau

Aucune donnée bibliographique relative à la perméabilité à l'eau de ces matériaux n'a été retrouvée. Toutefois, au regard de leur composition et de leur granulométrie (sableuse), leur perméabilité peut être estimée de l'ordre de 10^{-4}-10^{-5} m/s.

Conclusion :

Perméabilité à l'eau		
Gamme	**Appréciation quantitative Ks (m/s)**	**Appréciation qualitative**
0	$10^{-2} \leq Ks < 10^{-4}$	Perméable
1	$10^{-4} \leq Ks < 10^{-7}$	Semi perméable
2	$10^{-7} \leq Ks < 10^{-10}$	Imperméable
3	$Ks \geq 10^{-10}$	Très imperméable

Structure (agrégation)

Aucune donnée bibliographique relative à la structure (agrégation) de ces matériaux n'a été retrouvée.

Au regard de leur composition[15] (absence d'argiles, environ 8 % de MO dans les résidus des réseaux d'eaux pluviales, environ 12 à 21 % de MO dans les résidus des réseaux d'eaux usées), on ne peut exclure qu'une structure en agrégat se constitue dans ces matériaux, bien que cette possibilité ne soit pas documentée dans la bibliographie consultée.

Conclusion :

Structure	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Absente
1	Faible
2	Moyenne
3	Bonne

Granulométrie

Données bibliographiques relatives à la granulométrie :

- **Matériaux issus du curage des réseaux d'eau usée (EU) :**

Les caractéristiques physico-chimiques des résidus de curage fluctuent fortement et dépendent du type de réseau, du mode de gestion des réseaux, de la pluviométrie, etc. Elles sont principalement constituées d'eau

[15] Site internet OFRIR et Sogeti (2004)

(entre 40 et 80 %), de matière organique (12 à 21 %) et de matière minérale (jusqu'à 60%). Les résidus de curage de réseaux contiennent en général des macro-déchets. La granulométrie moyenne des résidus de curage de réseau EU produits en région Ile de France (Sogeti, 2004) est présentée dans le tableau ci-dessous.

Unité		Résidus de curage de réseaux
Ø	0-0.1 mm	1 à 10%
	0.1-2 mm	20 à 30%
	2 mm et plus	50 à 70 %

Source : TSM dossier/ numéro 4 – p.44-48 /avril 2000

Composition moyenne de résidus de curage de réseau produits en région Ile de France (Sogeti, 2004)

Toujours concernant les résidus de curage des réseaux d'eau usée, les caractéristiques granulométriques suivantes sont présentées dans Lissalde (2002).

Granulométrie en mm	d<5	d<2	d<1	d<0,4	d<0,2	d<0,1	d<0,08	d10	d50
Provenance des sous-produits	% massiques cumulés								
Collecteurs séparatifs EU	> 69,8	63,4	58,4	30,14	7				

Granulométrie des résidus de curage des réseaux EU (Lissalde, 2002)

- **Matériaux issus du curage des réseaux d'eau pluviale (EP) :**

Les caractéristiques granulométriques les résidus de curage des réseaux d'eau pluviale ci-dessous sont issues de Lissalde (2002).

Granulométrie en mm	d<5	d<2	d<1	d<0,4	d<0,2	d<0,1	d<0,08	d10	d50
Provenance des sous-produits	% massiques cumulés								
Collecteurs séparatifs EP	66	48	38	17	2	0	0		2,25

Granulométrie des résidus de curage des réseaux EP (Lissalde, 2002)

Il est précisé sur le site internet OFRIR (Chebbo, 1992 ; Gromaire, 1998) que les dépôts formés dans les canalisations sont très hétérogènes et d'une manière générale constitués de particules plus organiques et plus fines que dans les collecteurs (les dépôts dans les collecteurs ayant un diamètre médian voisin de 1 mm).

Conclusion :

Au regard de l'ensemble de ces informations, la granulométrie moyenne des résidus de curage des réseaux est estimée sableuse.

Granulométrie		
Gamme	**Appréciation quantitative Taille de particules**	**Appréciation qualitative**
0	T < 2 µm	Argileux
1	2 ≤ T < 50 µm	Limoneux
2	50 ≤ T < 2 mm	Sableux
3	T ≥ 2 mm	Grossier

Caractéristiques agronomiques des matériaux

pH

Données bibliographiques relatives au pH :

Le site internet OFRIR (ASFA, 1993) indique une valeur de pH de 7,6 pour les matériaux de curage des bassins d'eau pluviale.

Cet ordre de grandeur est confirmé par les mesures de pH sur lixiviat de 7,5-8 effectuées sur des sables issus du lavage des matériaux de curage des réseaux d'eau pluviale de la ville de Limoge (Lissalde, 2002).

Conclusion :

pH		
Gamme	**Appréciation quantitative Valeurs de pH**	**Appréciation qualitative**
0	pH < 5	Acide
1	5 ≤ pH < 6,5	Acide/neutre
2	6,5 ≤ pH < 7,5	Neutre
3	pH ≥ 7,5	Basique

N total

Aucune donnée bibliographique retrouvée.

$CaCO_3$ total

Aucune donnée bibliographique retrouvée.

Carbone organique

Aucune donnée bibliographique relative au carbone organique n'a été retrouvée. En revanche, les teneurs en matières organiques et minérales sont documentées.

- **Matériaux issus du curage des réseaux d'eau usée (EU) :**

Sogeti (2004) indiquent que les résidus de curage des réseaux EU sont constitués de matière organique (12 à 21 % matière brute).

- **Matériaux issus du curage des réseaux d'eau pluviale (EP) :**

Les sédiments de voiries, de fossés, de dessableurs et de collecteurs d'eaux pluviales sont peu chargés en matière organique (< 10%) contrairement aux boues de bassins, aux sédiments d'avaloirs et de collecteurs d'eaux usées (Lissalde, 2002).

Le site internet OFRIR indique que le taux moyen de matières volatiles, et donc la teneur en matière organique dans ces sédiments, est relativement faible comparé aux boues de stations d'épuration (8 % /50-60 %).

De plus, les dépôts formés dans les canalisations sont très hétérogènes. Les particules qui les constituent sont plus organiques et plus fines que dans les collecteurs (site internet OFRIR).

- **Sables issus du curage des réseaux d'eau pluviale (EP) traités :**

Les sables issus du curage des réseaux d'eau pluviale après lavage présentent des teneurs en matière organique de :

- 5 % après traitement par le procédé Ecosable (Lissalde, 2002) ;
- 7 % après criblage sur crible rotatif (Sermanson, 1998, dans site internet OFRIR) ;
- 5 % après traitement par le procédé Valori'sable (Domas et a.l, 2000, dans site internet OFRIR).

La revue bibliographique effectuée par Lissalde (2002) sur les caractéristiques des sous-produits de l'assainissement fournit les teneurs en matière organique suivantes.

	Teneur en matière sèche (%)	Teneur en MO (% MS)
Collecteurs séparatifs EP	82,8 - 90	1,1 - 10,8
Collecteurs séparatifs EU	61,2 - 81,4	0,6 – 85,5
Collecteurs unitaires	66,1 - 77	2 – 41,5

Caractéristiques des matériaux de curage des réseaux (Lissalde, 2002)

Conclusion :

Les données bibliographiques disponibles indiquent une teneur en MO d'environ 8 % dans les résidus des réseaux d'eaux pluviales et d'environ 12 à 21 % dans les résidus des réseaux d'eaux usées. Considérant un ratio théorique de la teneur en MO sur la teneur en carbone organique de 2, **la teneur en carbone organique est**

estimée à 4 % dans les résidus des réseaux d'eaux pluviales et à 6 à 11 % dans les résidus des réseaux d'eaux usées.
Sur la base de ces données, nous retiendrons la valeur intermédiaire de teneur en carbone organique de 8 %.

CEC

Aucune donnée bibliographique retrouvée.

P assimilable

Aucune donnée bibliographique retrouvée.

Au regard de la composition des résidus de curage des réseaux (faible teneur en MO), la teneur en P assimilable est probablement médiocre.

Conclusion :

P assimilable		
Gamme	**Appréciation quantitative P assimilable (g/kg) préciser méthode d'extraction**	**Appréciation qualitative de la fertilité phosphatée**
0	P < 0,04	Très faible
1	0,04 ≤ P < 0,08	Médiocre
2	0,08 ≤ P < 0,12	Normale/correcte
3	P ≥ 0,12	Elevée

Caractéristiques de dangerosité des matériaux

pH sur éluat

Données bibliographiques relatives au pH sur éluat :

Des mesures de pH sur lixiviat ont été effectuées sur des sables issus du lavage des matériaux de curage des réseaux d'eau pluviale de la ville de Limoge. Les résultats indiquent des valeurs de 7,5-8 (Lissalde, 2002).

Conclusion :

S'agissant de la seule donnée disponible, **la valeur intermédiaire de 7,7 unités pH est retenue** comme caractéristique des matériaux de curage des réseaux, bien que celle-ci porte sur des matériaux après lavage.

Teneur ou concentration totale en polluants

Données bibliographiques relatives à la teneur (ou concentration) totale en polluants :

La revue bibliographique effectuée par Lissalde (2002) sur les caractéristiques des sous-produits de l'assainissement fournit les teneurs en polluants suivantes.

Lieu de collecte	MS (%)	MO (% MS)	Pb (mg/kg MS)	Cu (mg/kg MS)	Zn (mg/kg MS)	Cd (mg/kg MS)	HC (mg/kg MS)
Collecteurs séparatifs EP	82,8 - 90	1,1 - 10,8	21 - 245	22 - 210	105 - 742	0,02 - 7,2	4,2 - 134
Collecteurs séparatifs EU	61,2 - 81,4	0,6 - 85,5	18 - 960	414	380 - 770	0,12 - 7	10,0 -29
Collecteurs unitaires	66,1 - 77	2,0 - 41,5	86 - 1400	50 - 830	148 - 10100	0,4 - 10,6	25 - 2031

Caractéristiques des matériaux de curage des réseaux (Lissalde, 2002)

Ces teneurs ne sont pas négligeables au regard du « bruit de fond » de ces substances dans les sols et les sédiments.

Le tableau ci-dessous présente les résultats d'analyse des sables obtenus après lavage des sous-produits de l'assainissement.

Paramètre	Extract	Dijon	Strasbourg	Nantes	
				Moyenne	Maximum

Cd	3,5	<10	1,2	0,292	1,1
Cr	27	294	/	17,11	83,2
Cu	53	/	/	95	530
Hg	1,4	/	/	3,277	21,9
Ni	25	/	/	7,6	24,8
Pb	61	112	143	99,9	391
Zn	56	/	/	114,3	311
Fluoranthène				2,67	
Benzo(b)fluoranthène				0,046	
Benzo(k)fluoranthène				0,023	
Benzo(a)pyrène				0,005	
Benzo(g,h,i)pérylène				0,005	
Indéno-1,2,3-c,d-pyrène				0,013	
Hydrocarbures totaux				116,5	

Teneur en mg/kg-MS en polluants dans les sables après traitement (Lissalde, 2002)

Conclusion :

Teneur/Concentration totale des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	En trace
2	Contamination possible
3	Contamination fréquente

Disponibilité des polluants

Aucune donnée bibliographique relative à la disponibilité des polluants n'a été retrouvée pour les matériaux de curage des réseaux sans traitement.

En revanche, des tests de lixiviation ont été réalisés sur des sables issus de l'assainissement pluvial après lavage.

Domas et al. (2000, site internet OFRIR) ont réalisé des tests de lixiviation selon la norme NF X 31-210 sur des sables lavés issus du curage des réseaux d'eau pluviale. Des essais en cases lysimétriques de 1 m^3 sur ce même matériau préalablement compacté ont également été réalisés en simulant les pluies par arrosage régulier à l'aide d'eau déminéralisée. Les concentrations mesurées sur l'éluat des tests de lixiviation et sur les eaux de percolation dans les lysimètres sont comparables :

- concentrations en hydrocarbures totaux de l'ordre de 1 mg/L ;
- concentrations en HAP inférieures à 0,07 µg/L ;
- concentrations en sulfates et métaux lourds qui ne posent pas de problème, à l'exception de Pb et Hg qui montrent quelques valeurs élevées.

De même, Helaine (2000) fournit des résultats d'analyse des polluants sur éluat, après lixiviation sur des sables lavés par le procédé « Ecosable ».

Paramètres étudiés	Caractéristiques moyennes du sable lavé (mg/kg)	Valeurs seuils mâchefers "V"
Hg	< 0,03	< 0,2
Pb	< 1,55	< 10
Cd	< 0,3	< 1
As	< 0,05	< 2
Cr^{3+}	< 0,3	< 1,5
Sulfates	2145	< 10 000
COT	217	< 1500
Hydrocarbures totaux	< 26	1000 (d'après IFP)

Résultats d'analyse de l'éluat, après lixiviation sur des sables lavés par le procédé « Ecosable » (Helaine, 2000)

Conclusion :

Au regard des éléments suivants :

- teneurs en polluants significatives dans les matériaux de curage des réseaux bruts ;
- absence de donnée sur éluat relative matériaux de curage sans traitement ;
- fraction lixiviable de certains polluants dans les sables obtenus après lavage des matériaux de curage significative ;

les transferts de polluants vers les eaux souterraines sont considérés comme possibles en immédiats.

Disponibilité des polluants	
Gamme	**Appréciation qualitative**
0	Nulle
1	Très faible/négligeable
2	Possible en différé
3	Possible en immédiat

Remarque : Aucune donnée relative aux transferts sol plante n'a été identifiée dans la littérature.

Bibliographie

Lissalde A.-M. (2002) Caractérisation, traitement et valorisation des sous-produits d'assainissement pluvial, Mémoire de fin d'étude IGS 2001-2002.

Sogeti (2004) DEPARTEMENT DE LA SEINE MARITIME : Schéma Départemental d'Elimination des Matières de Vidange, des Sous-Produits issus de l'Assainissement Collectif et des graisses artisanales ou industrielles en Seine Maritime, PHASE I : Cadre de l'étude, Affaire n°26116, version 2.

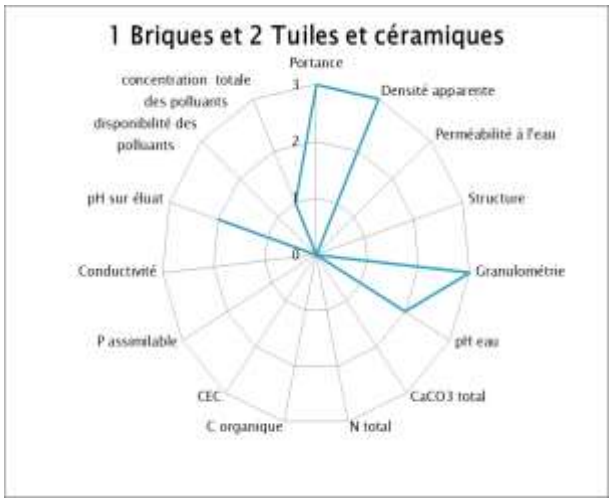
Helaine D. (2000) Les boues de curage des réseaux d'assainissement : caractéristiques et techniques de traitement/valorisation, TSM, n°4-95ème année.

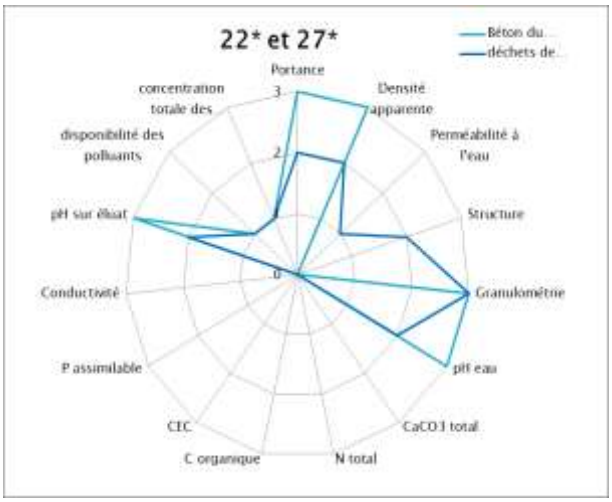
Site internet OFRIR : http://ofrir.lcpc.fr/portail_lcpc/html/accueil/accueil_articles_theme.php

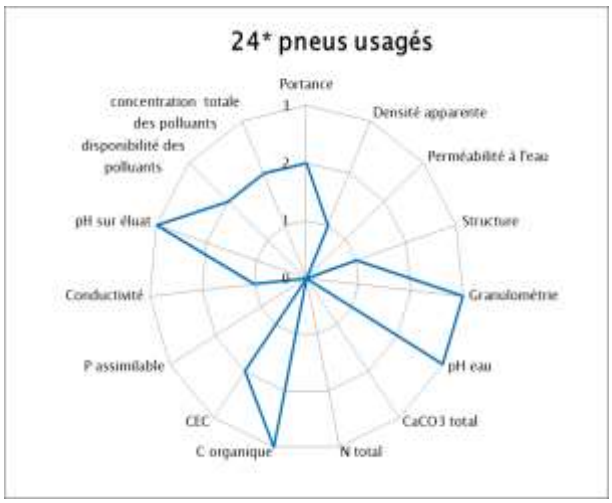
Tauveron-Asconade M. (2010) Problématiques des sous-produits de l'assainissement, présentation à une journée technique du 25 mai 2010 à Besançon.

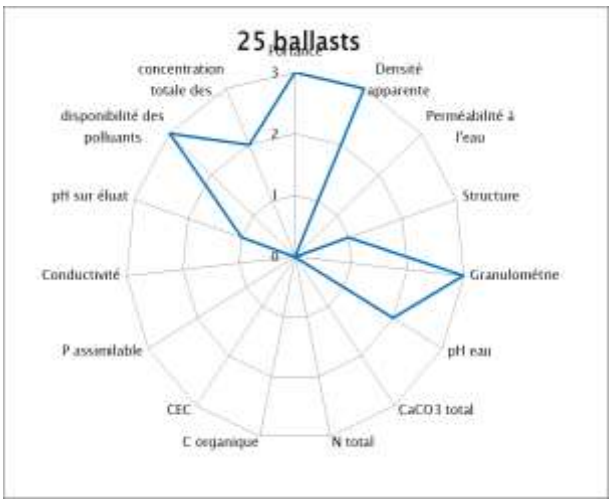
Annexe 4 : Les typologies de matériaux

1er groupe :



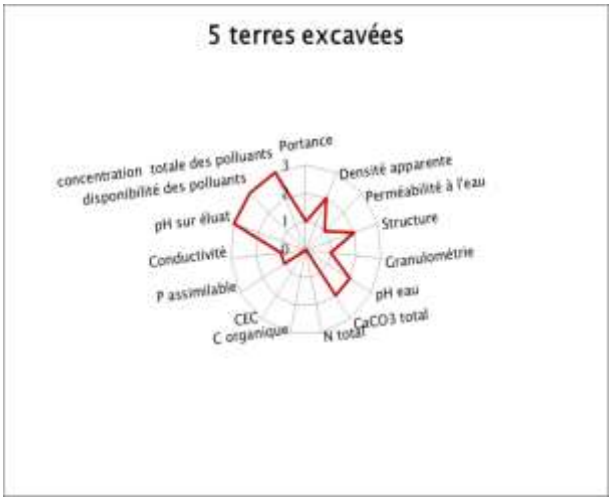




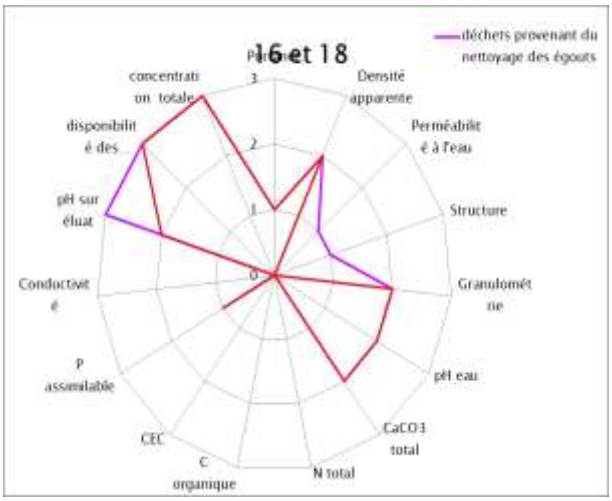


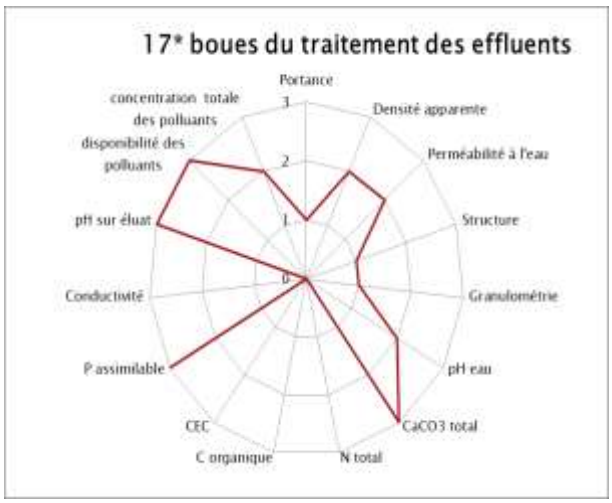
2ème groupe

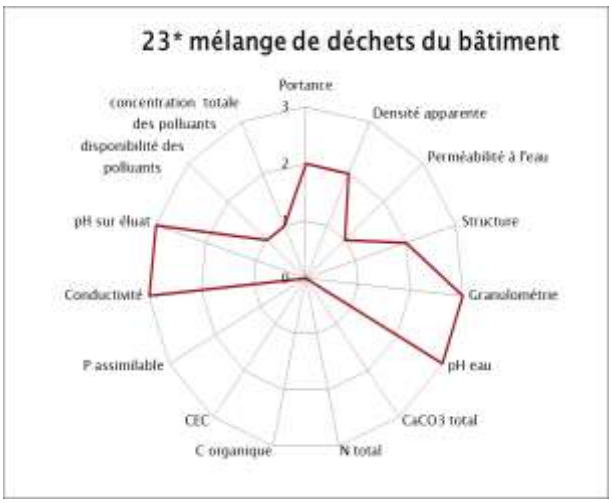

Déchet issus de la fabrication de la chaux/plâtre/ciment (3 avant cuisson– 4 de calcination et d'hydratation de la chaux)
Portance
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
concentration totale des polluants
disponibilité des polluants


5 terres excavées
Portance
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
concentration totale des polluants
disponibilité des polluants

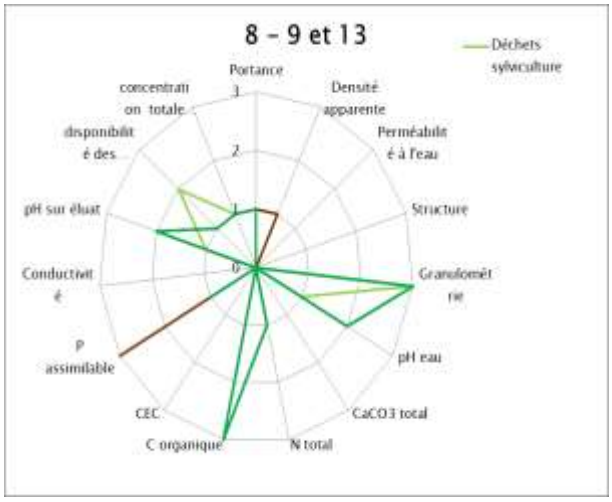

6 minéraux issus du traitement déchets dessablage STEP
Portance
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
concentration totale des polluants
disponibilité des polluants

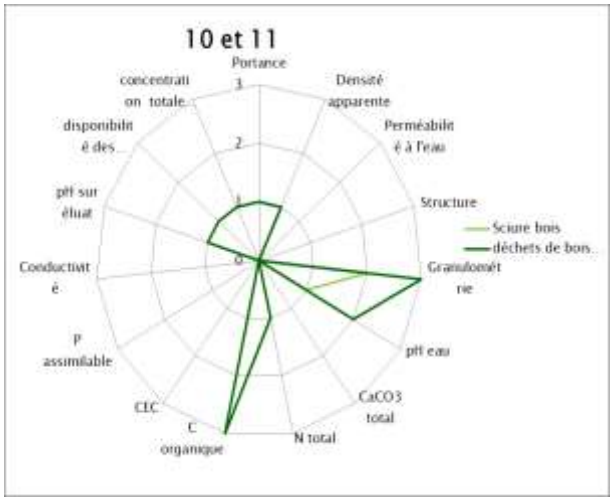

16 et 18
déchets provenant du nettoyage des égouts
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
concentration totale
disponibilité des

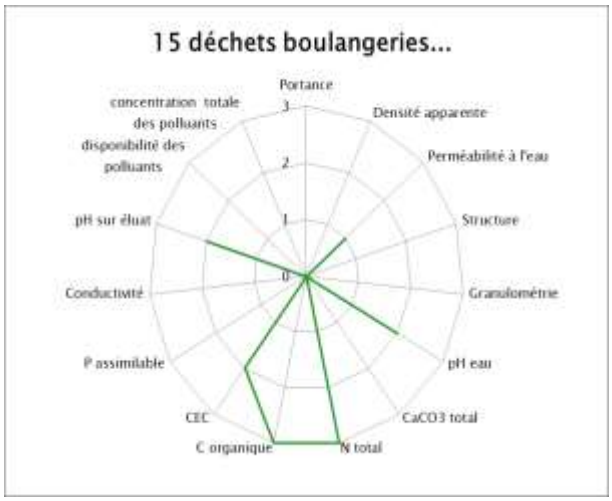

17* boues du traitement des effluents
Portance
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
concentration totale des polluants
disponibilité des polluants

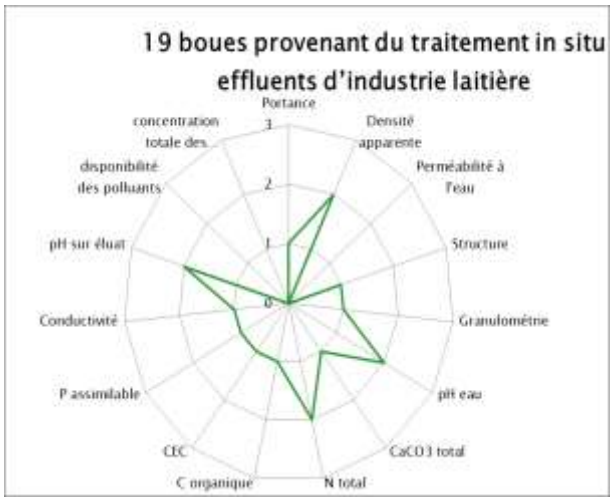

23* mélange de déchets du bâtiment
Portance
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
concentration totale des polluants
disponibilité des polluants

3ème groupe :

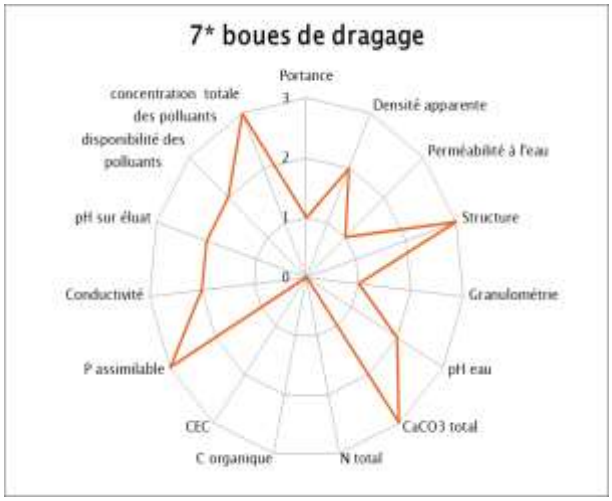

8 – 9 et 13
Déchets sylviculture
Portance
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
disponibilité des
concentration totale

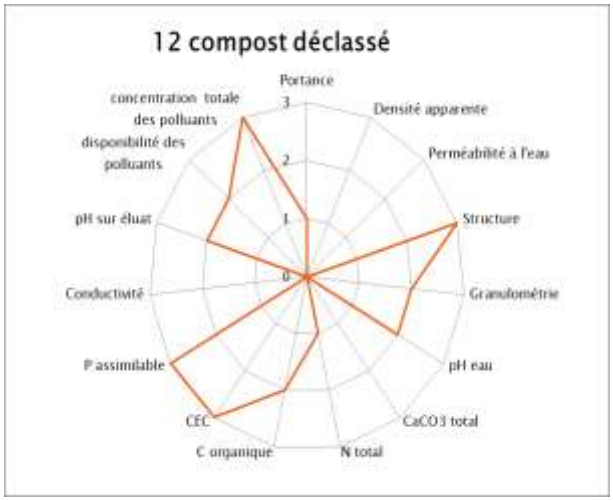

10 et 11
Sciure bois
déchets de bois
Portance
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
disponibilité des
concentration totale

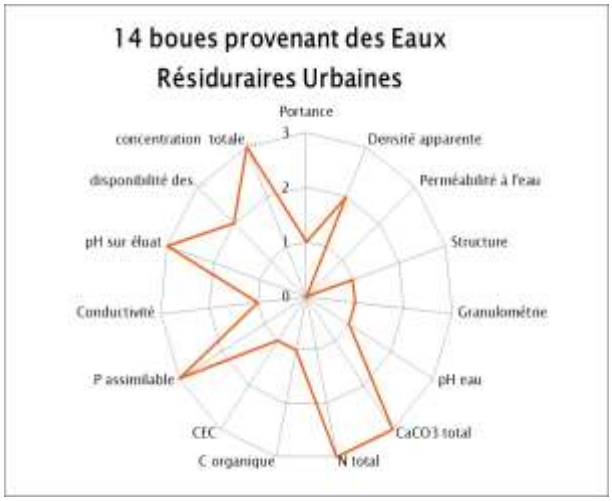

15 déchets boulangeries...
Portance
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
disponibilité des polluants
concentration totale des polluants

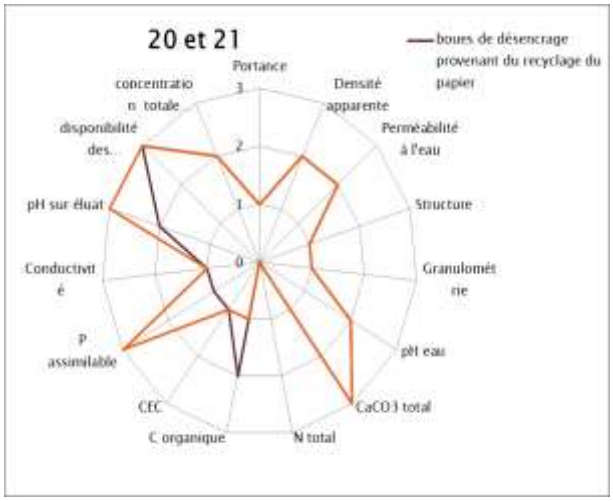

19 boues provenant du traitement in situ effluents d'industrie laitière
Portance
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
disponibilité des polluants
concentration totale des

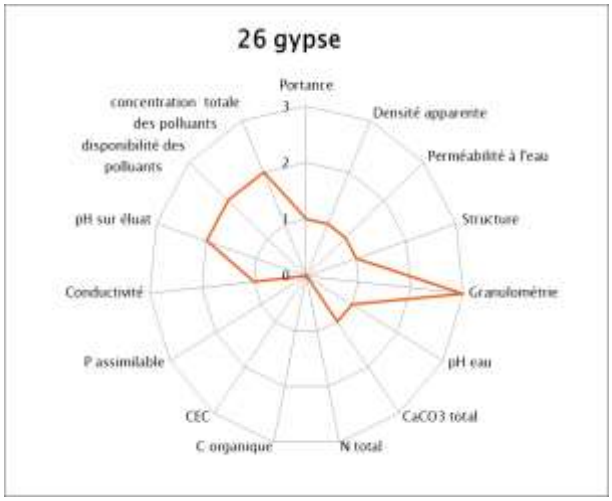
4ème groupe :


7* boues de dragage
Portance
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
disponibilité des polluants
concentration totale des polluants


12 compost déclassé
Portance
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
disponibilité des polluants
concentration totale des polluants


14 boues provenant des Eaux Résiduraires Urbaines
Portance
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
disponibilité des
concentration totale


20 et 21
boues de désencrage provenant du recyclage du papier
Portance
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
disponibilité des
concentration totale


26 gypse
Portance
Densité apparente
Perméabilité à l'eau
Structure
Granulométrie
pH eau
CaCO3 total
N total
C organique
CEC
P assimilable
Conductivité
pH sur éluat
disponibilité des polluants
concentration totale des polluants

Annexe 5 : Caractérisation individuelle des matériaux modèles SITERRE

		Matériaux minéraux et inertes							Matériaux organiques et organo-minéraux				
	Code SITERRE	10	2	11	9	6	12	8	4	7	5	3	1
Unité	Désignation	Ecarts fabrication briques	Béton concassé	Ballasts usagés chemins de fer	Déchets de déconstruction de bâtiments en mélange	Pneus usagés	Terres de déblais excavées non contaminées acides	Terres de déblais excavées non contaminées alcalines	Déchets verts broyés	Déchets de balayage de rues	Boues papetières	Boues de stations d'épuration	Compost de déchets verts et boues de STEP
		BR	BE	BA	DB	-	TA	TB	DV	DR	SP	BS	CO
Propriétés mécaniques (matériau brut)													
%	Granulométrie < 2 mm	1,5	2,5	14,3	5,4	nd	54,97	89,5	nd	nd	100	100	nd
%	Granulométrie >50mm	0	27,6	0	0	nd	0	0	nd	nd	0	0	nd
t/m3	Masse volumique des grains	2,44	2,5	2,95	2,46	nd	2,72	2,69	nd	nd	2,14	1,28	nd
Indice Los Angeles LA	Résistance à la fragmentation	47	32	13	24	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Indice Micro Deval MDE	Résistance à l'attrition et l'usure	73	26	17	25	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
$\rho\delta_{OPN}(g/cm^3)$ / $w_{OPN}(\%)$	Proctor (5 points)	nd	nd	nd	nd	nd	1.89 / 12.7	1.72 / 15	nd	nd	<1 / >40	<1 / >50	nd
Indice (voir GTS)	IPI	nd	nd	nd	nd	nd	30,7	18	nd	nd	1	1	nd
%	Comportement au gel	0,31	7,79	0,29	1,76	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
g de bleu/100g	Valeur au bleu	0,18	0,15	0,5	0,11	nd	nd	0,37	0,6	<0.07	0,64	0,21	1,28
Minéralogie													
(-) probable en trace ; (+) faible ; (++) présent ; (+++) abondant	DRX Global + DRX argile	Quartz (++) Plagioclase (-) Microcline (-) Argiles (++) : illite et/ou mica (++), kaolinite (+++), interstratifiés (+++) Calcite (+) Anhydrite (+)	Quartz(++) Plagioclase (-) Microcline(+) Argiles(+) : chlorite(++), illite et/ou mica(+++), kaolinite (++) Calcite(-) Gypse (-)	Quartz(+) Plagioclase (albite)(+) Microcline(+) Argiles(+) : chlorite(+++), interstratifiés(+++), illite et/ou mica(+) Amphibole (hornblende)(-) Calcite(-)	Quartz (+) Plagioclase (+) Microcline (+) Amphibole (actinote) (-) Argiles (++) : chlorite (++), illite et/ou mica (+++) Calcite (+) Gypse (-)	nd	nc	Quartz (++) Microcline (+) Argiles (++) : chlorite (+), illite et/ou mica (++), kaolinite (+++) Goethite (+)	Quartz (+++) Plagioclase (-) Microcline (-) Argiles (++) : illite et/ou mica (++), kaolinite (+++) Calcite (-)	Quartz (+) Plagioclase (-) Microcline (-) Argiles (++) : chlorite (+++), illite et/ou mica (++) Calcite (+)	Argiles(++) : kaolinite (++), talc (+) Calcite(+++)	Quartz (-) Plagioclase (-) Microcline (-) Argiles (+) : illite et/ou mica (+++), talc (+) Amorphe (+++)	Quartz (+) Plagioclase (+) Microcline (+) Argiles (+) : chlorite (+++), illite et/ou mica (++) Calcite (+)
	Couleur code Munsell	light red 2,5YR_6/6	light brownish gray 2,5Y_6/2	very dark grayish brown 2,5Y-3/2	brown 10YR_7/8 (weak red 10YR10R_5/3)	black 7,5YR/2_0	yellow orange 10YR_8/6	yellow 10YR_7/8 gray 10 YR_6/1	grayish brown 10YR_5/2 dark brown to brown 10YR4/3 olive yellow 2,5Y_6/6	dark grayish brown 10 YR_4/2	light bluish gray (for gley) 5B_7/1 light gray 2,5Y_7/0	White 5Y_8/1 Yellow 10YR_7/8 Black 10YR_2/1 black 2,5YR_2/10	black 5 YR_ 2,5/1
	Caractéristiques à l'œil nu	Fragments de tailles variées Homogène en nature Carbonatés	Couleur peu homogène Essentiellement de nature minérale Très carbonaté	Particules fines correspondant à des résidus de terre, et roches dures cristallisées Non carbonatés	Résidus de carrelage, brique, plâtre, verre, marbre, béton. Hétérogène en composition Forte proportion d'éléments très carbonatés	Très hétérogènes : présence de bouts métalliques ou non, présence en proportion variable en fibres. Non carbonaté	Essentiellement minéral et constitué de nombreuses particules fines Homogène Non carbonaté	Essentiellement minéral constitué de particules fines Homogène Non carbonaté	Résidus de feuilles, résineux Couleurs et natures des constituants hétérogènes Non carbonatés	Fragments inertes et indésirables variés (verre, mégots), sables, et résidus végétaux (ligneux et foliaires) Très hétérogène en constitution Quelques éléments carbonatés	Agrégats de boues plus ou moins grossiers Homogènes en constituants et couleur Très carbonatés	Agrégats de boues assez grossiers de couleur variable. Non carbonatés	Terreux et éléments végétaux figurés, essentiellement ligneux Non carbonaté

		Matériaux minéraux et inertes							Matériaux organiques et organo-minéraux				
	Code SITERRE	10	2	11	9	6	12	8	4	7	5	3	1
Unité	Désignation	Ecarts fabrication briques	Béton concassé	Ballasts usagés chemins de fer	Déchets de déconstruction de bâtiments en mélange	Pneus usagés	Terres de déblais excavées non contaminées acides	Terres de déblais excavées non contaminées alcalines	Déchets verts broyés	Déchets de balayage de rues	Boues papetières	Boues de stations d'épuration	Compost de déchets verts et boues de STEP
		BR	BE	BA	DB	-	TA	TB	DV	DR	SP	BS	CO
Propriétés agronomiques (structure <2mm)													
	Densité apparente	1,01	0,49	1,3	nd	nd	nd	0,85	0,58	0,01	0,22	0,04	0,07
	Densité réelle	2,65	2,5	2,9	2,51	nd	2,7	2,59	1,95	2,19	2,16	1,41	2,03
% massique	pF 2,5	21,4	13,6	8,5	19	3,2	22,6	26	74,9	72,3	43	169	50
% massique	pF 4,2	3,3	7,8	0,7	6,4	2,3	5,1	4,8	55,6	47,9	28,3	148	32,7
% massique	Eau utile	18,1	5,8	7,7	12,6	0,9	17,5	21,2	19,3	24,4	14,7	21	17,3
cm/s	Conductivité hydraulique Ks	2,53E-03	1,43E-03	nd	nd	nd	nd	2,69E-03	4,04E-03	1,14E-03	9,65E-03	7,02E-03	8,95E-03
% massique	Argile	8	8	8	13	nd	8	11	18	5	nd	nd	26
% massique	Limons fins	15	11	13	10	nd	44	42	10	5	nd	nd	29
% massique	Limons grossiers	9	7	10	7	nd	14	13	9	7	nd	nd	13
% massique	Sables fins	12	11	19	12	nd	12	15	14	19	nd	nd	8
% massique	Sables grossiers	55	64	50	58	nd	23	20	49	65	nd	nd	23
Propriétés agronomiques (chimie <2mm)													
%	Fraction organique	0,3	2,6	0,4	1,9	nd	2,6	2,2	55,3	28,3	28,1	69,5	41,4
%	Fraction minérale	99,7	97,4	99,6	98,2	nd	97,4	97,8	44,7	71,7	71,9	30,5	58,6
	pH	9,3	9,8	7,8	10,8	nd	4,93	8,7	7,7	7,9	8,3	7,4	7,9
g/kg matière sèche	CaCO3 Total	207	112	2,2	114	nd	<1	1,4	13,5	54,2	601	7,5	11,1
	CaCO3 actif	24,8	52,6	nd	63,8	nd	nd	nd	nd	nd	335	nd	nd
cmol+/kg matière sèche	C Total	12,1	26,7	18,5	20,3	nd	0,58	1,3	238	140	220	335	191
g/kg matière sèche	MO	2,6	26,2	3,6	18,5	nd	25,9	21,8	553	283	281	695	414
g/kg matière sèche	C Org	0	13,3	18,2	6,6	nd	nd	1,1	236	134	148	334	190
g/kg matière sèche	N total	0,07	0,47	0,55	0,53	nd	0,324	0,46	13,8	4,7	2,5	60,3	21,4
g/kg matière sèche	P Olsen	0,026	0,061	0,041	0,089	nd	0,005	0,05	1,09	0,179	0,094	3,85	0,935
cmol/kg	CEC Metson	1,58	8,21	5,8	3,96	nd	1,73	1,49	23,8	6,73	2,61	74	31,4
g/kg matière sèche	Si extractible	1,6	4	1,4	2,9	nd	0,78	1,2	2	1,2	1,1	1,3	0,9
g/kg matière sèche	Al extractible	1,5	2,2	0,9	1,5	nd	1,49	1,6	0,6	0,7	0,8	4,2	1,9
g/kg matière sèche	Fe extractible	16,9	9,1	27,3	8,2	nd	16	22,4	4,8	6,4	0,5	62,2	13,3
Eléments majeurs totaux (<2mm)													
%	Matières volatiles (450°C)	0,6	2,5	2,8	nd	nd	2.2	2,2	56,2	14,6	25,1	64,9	44
mg/kg matière sèche	Al	75511	39159	77028	nd	nd	85149	85756	15109	42625	24673	10910	34780
mg/kg matière sèche	Ca	59802	64676	51400	nd	nd	265	694	22660	38398	252214	26210	29074
mg/kg matière sèche	Fe	35900	20596	98212	nd	nd	22728	31718	8745	30089	1292	64830	22016
mg/kg matière sèche	Mg	4123	4376	31067	nd	nd	1311	4742	2993	10810	4091	5431	5665
mg/kg matière sèche	Mn	179	407	1510	nd	nd	31	118	218	409	41	115	468
mg/kg matière sèche	P	296	539	1137	nd	nd	276	120	2525	875	347	41662	9237
mg/kg matière sèche	K	13642	15809	7369	nd	nd	25944	25510	15998	11905	876	8344	17557
mg/kg matière sèche	Si	325560	359225	250170	nd	nd	395710	369530	150830	295950	31160	24270	170530
mg/kg matière sèche	Na	905	6222	21192	nd	nd	1162	690	2063	14160	150	1987	7738
mg/kg matière sèche	Ti	2087	1318	8130	nd	nd	2503	1409	494,00	2549	568	673	1167
Eléments majeurs totaux (<4mm)													
%	Matières volatiles (450°C)	0,5	2,9	2,7	nd	nd	2.1	2,2	67,8	22,7	25,1	66,3	35,6
mg/kg matière sèche	Al	80679	40237	78470	nd	nd	82245	85789	9828	44417	24673	10850	41341
mg/kg matière sèche	Ca	53112	63848	52073	nd	nd	160	695	23515	43007	252214	25236	26212
mg/kg matière sèche	Fe	36008	21895	92532	nd	nd	19736	34760	7344	32762	1292	61324	24876
mg/kg matière sèche	Mg	4199	4276	30727	nd	nd	1242	4760	2329	12720	4091	5317	6367
mg/kg matière sèche	Mn	180	430	1443	nd	nd	22	119	168	437	41	110	496
mg/kg matière sèche	P	279	527	1035	nd	nd	244	120	2097	1006	347	40800	7952
mg/kg matière sèche	K	14306	15901	7409	nd	nd	25167	26000	14311	10627	876	8103	17885
mg/kg matière sèche	Si	337535	361950	262380	nd	nd	399640	364130	84060	254960	31160	26910	207640
mg/kg matière sèche	Na	939	6850	217770	nd	nd	1159	660	1333	14830	150	1912	9366
mg/kg matière sèche	Ti	2630	1342	7925	nd	nd	2694	1422	371,00	2776	568	988	1473

		Matériaux minéraux et inertes							Matériaux organiques et organo-minéraux				
	Code SITERRE	10	2	11	9	6	12	8	4	7	5	3	1
Unité	Désignation	Ecarts fabrication briques	Béton concassé	Ballasts usagés chemins de fer	Déchets de déconstruction de bâtiments en mélange	Pneus usagés	Terres de déblais excavées non contaminées acides	Terres de déblais excavées non contaminées alcalines	Déchets verts broyés	Déchets de balayage de rues	Boues papetières	Boues de stations d'épuration	Compost de déchets verts et boues de STEP
		BR	BE	BA	DB	-	TA	TB	DV	DR	SP	BS	CO
ETMs sur solide (<2mm)													
mg/kg matière sèche	Sb	<2.0	3,6	8,6	nd	nd	3,9	2,7	<2.0	5,6	<2.0	4,5	<2.0
	Ba	218	351	132	nd	nd	431	376	146	297	32	347	275
	Mo	1,0	0,63	3,3	nd	nd	0,7	<0.40	1,0	2,4	0,73	4,2	1,6
	Sn	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Se	1,0	<1.0	<1.0	nd	nd	1	<1.0	1,2	3,5	<1.0	<1.0	2,0
	Pb	29	36	23	nd	nd	11	17	31	53	11	28	33
	Zn	60	140	150	nd	nd	21	63	106	203	14	494	250
	Cr	55	33	111	nd	nd	46	59	17	52	13	20	32
	Cu	19	46	88	nd	nd	6,4	24	26	70	54	225	104
	Cd	<0.10	0,28	0,36	nd	nd	0,2	<0.10	0,17	0,18	0,10	1,3	0,44
	As	28	8,3	20	nd	nd	16	11	4,7	7,9	<1.0	4,2	15
	Hg	<0.02	0,11	0,03	nd	nd	< 0,05	<0.02	0,06	0,1	<0.02	0,68	0,34
	Ni	19	16	34	nd	nd	14	32	7,9	30	7,9	28	16
ETMs sur solide (<4mm)													
mg/kg matière sèche	Sb	2,3	12	6,3	nd	nd	2,8	2,6	<2,0	4,6	<2,0	2,9	<2,0
	Ba	228	326	131	nd	nd	423	368	111	247	32	346	290
	Mo	1,0	0,72	2,7	nd	nd	0,6	<0,4	1,7	1,5	0,7	4,4	1,4
	Sn	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Se	1,4	1,4	<1,0	nd	nd	0,6	<1,0	1,4	1,3	<1,0	<1,0	3,7
	Pb	27	746	20	nd	nd	9,3	18	13	30	11	28	30
	Zn	62	139	135	nd	nd	21	65	85	189	14	487	225
	Cr	59	31	104	nd	nd	45	58	18	53	13	20	34
	Cu	19	35	78	nd	nd	5,7	25	23	56	54	226	88
	Cd	<0,1	0,17	0,29	nd	nd	0,2	<0,1	0,15	0,19	0,1	1,4	0,28
	As	27	9,6	21	nd	nd	12	12	4,4	4,3	<1,0	4	9,3
	Hg	nd	nd	nd	nd	nd	< 0,05	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Ni	31	16	31	nd	nd	15	33	6,4	24	7,9	16	16
Organiques													
mg/kg matière sèche	hydrocarbures (impair)	0,57	2,96	2,05	0,97	nd	nd	0,39	2,66	4,95	23,9	13,14	4,78
	HAP												
mg/kg matière sèche	Acénaphtylène	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	nd	nd	<0.1	0,119	<0.1	<0.1	<0.1	0,297
	Acénaphtène	<0.01	0,022	0,087	<0.01	nd	nd	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0,014	<0.01
	Anthracène	<0.01	0,053	0,176	0,028	nd	nd	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0,014
	Benzo (a) anthracène	<0.05	0,159	1,329	0,1	nd	nd	<0.05	0,091	<0.05	<0.05	<0.05	0,079
	Benzo (a) pyrène	<0.01	0,232	1,017	0,113	nd	nd	<0.01	0,111	0,036	<0.01	0,072	0,118
	Benzo (a) fluoranthène	<0.05	0,29	2,503	0,141	nd	nd	<0.05	0,146	0,072	<0.05	0,089	0,15
	Benzo (ghi) pérylène	<0.01	0,173	0,528	0,061	nd	nd	<0.01	0,083	0,035	<0.01	0,057	0,108
	Benzo (k) floranthène	<0.01	0,13	1,098	0,056	nd	nd	<0.01	0,063	0,028	<0.01	0,047	0,067
	Chrysène	<0.01	0,16	2,069	0,093	nd	nd	<0.01	0,094	0,067	0,025	0,059	0,096
	Dibenzo (ah) anthracène	<0.01	0,016	0,072	<0.01	nd	nd	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0,013
	Fluoranthène	<0.1	0,338	5,595	0,214	nd	nd	<0.1	0,163	0,119	<0.1	<0.1	0,141
	Fluorène	<0.01	0,041	0,115	<0.01	nd	nd	<0.01	0,02	0,011	0,351	<0.01	0,11
	Indéno pyrène	<0.01	0,152	0,687	0,08	nd	nd	<0.01	0,1	0,014	<0.01	0,082	0,105
	Naphtalène	<0.01	0,033	0,26	0,013	nd	nd	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0,022
	Phénanthrène	<0.01	0,229	1,283	0,156	nd	nd	<0.01	0,109	0,068	0,251	0,062	0,138
	Pyrène	<0.1	0,353	4,12	0,167	nd	nd	<0.1	0,146	<0.1	<0.1	0,114	0,113
	PCB												
mg/kg matère sèche	Congénère 28	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	nd	nd	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
	Congénère 52	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	nd	nd	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
	Congénère 101	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	nd	nd	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
	Congénère 118	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	nd	nd	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
	Congénère 138	<0.015	<0.015	0,019	<0.015	nd	nd	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
	Congénère 153	<0.015	<0.015	0,016	<0.015	nd	nd	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
	Congénère 180	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	nd	nd	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015

		Matériaux minéraux et inertes							Matériaux organiques et organo-minéraux				
	Code SITERRE	10	2	11	9	6	12	8	4	7	5	3	1
Unité	Désignation	Ecarts fabrication briques	Béton concassé	Ballasts usagés chemins de fer	Déchets de déconstruction de bâtiments en mélange	Pneus usagés	Terres de déblais excavées non contaminées acides	Terres de déblais excavées non contaminées alcalines	Déchets verts broyés	Déchets de balayage de rues	Boues papetières	Boues de stations d'épuration	Compost de déchets verts et boues de STEP
		BR	BE	BA	DB	-	TA	TB	DV	DR	SP	BS	CO
Lixiviation (<4mm sauf pneus et déchets du bâtiment bruts)													
	pH	9,37	11,04	7,99	11,03	7,48	5,3	8,05	7,38	7,83	7,85	7,56	7,90
µS/cm	conductivité	1671	997	79	1831	36	11	75	2284	635	597	5957	2354
mg/kg matière sèche	fraction soluble	17090	16280	323	18330	705	847	62	36720	6060	7490	67490	39380
mg/kg matière sèche	Al	2,8	8,7	7,9	4,5	<1	<1	1,9	13	5,2	1,6	22	50
	Ca	4540	2051	119	4980	45	3,5	100	794	477	1643	805	568
	Fe	<0.05	0,85	19	<0.3	3,0	<0.05	1,4	23	9,9	8,1	234	134
	Mg	15	0,85	18	2,6	1,3	1,1	15	284	105	40	493	124
	Mn	<0.01	<0.02	0,66	<0.02	0,32	0,04	0,02	7,4	2,1	0,26	0,79	8,2
	P	<1	<1	4,4	<1	<1	<1	<1	752	39	6,1	1999	706
	K	49	222	15	96	11	8,5	12	6885	1190	20	3600	3840
	Si	46	107	37	97	2,9	11	49	248	86	26	147	567
	Na	5,5	91	11	46	12	1,7	20	213	123	70	897	924
	S	3500	1500	23	3620	11	nd	17	240	86	39	1795	513
	Ti	<0.02	<0.07	0,22	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0,41	0,11	0,3	0,19	0,72
	Sb	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Ba	0,29	0,28	0,11	0,19	0,09	<0.1	0,06	2,1	0,42	0,56	1,1	1,6
	Mo	0,44	0,08	0,06	<0.04	<0.03	0,03	<0.02	<0.02	0,09	0,05	0,51	0,26
	Sn	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	nd	<0.01	0,03	0,05	<0.01	0,32	0,25
	Se	<0.07	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0,71	<0.07
	Pb	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0,36	0,52	<0.05	0,85	0,38
	Zn	<0.05	<0.05	0,55	<0.05	2,9	<0.05	<0.65	4,1	18	1,2	9,9	6,3
	Cr	0,20	0,26	<0.05	<0.13	<0.05	<0.05	<0.05	0,09	<0.05	<0.05	<0.06	0,12
	Cu	0,04	0,26	0,23	0,08	0,04	<0.02	<0.02	2,3	2,6	0,10	17,8	5,8
	Cd	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.01	<0.005	0,01	0,01	<0.005	0,09	0,03
	As	0,87	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0,55	0,2	<0.05	1,7	2,2
	Hg	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0,02	0,02
	Ni	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0,35	0,3	<0.05	2,3	0,29
	Cl-	<50	83	<50	100	<50	7	62	1552	253	99	1054	2495
	F-	27	3,1	3,0	5,0	<2	0,3	10	<2.1	2,3	<2.2	<2.5	3,2
	SO43-	9520	4146	90	9470	<50	11	51	427	161	<54	3568	694
	NO3-	<10	42	35	100	<10	12	13	<10	<10	<10	<11	<10
	NO2-	0,23	2,1	0,10	0,70	0,20	nd	0,37	13	3,8	0,73	14	16
	PO43-	1,1	0,4	12	0,18	0,38	<0.3	0,30	1890	71	2,3	4500	1974
mg C/kg matière sèche	COT	23	71	52	100	115	nd	15	11080	1655	1848	28450	10240
mg/kg matière sèche	hydrocarbures (C10-C40)	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<2	<1	<1	1,9	<1
	indice phenol	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0,15	<0.1	<0.1	13	1,9	1,8	254	0,16

		Matériaux minéraux et inertes							Matériaux organiques et organo-minéraux				
	Code SITERRE	10	2	11	9	6	12	8	4	7	5	3	1
Unité	Désignation	Ecarts fabrication briques	Béton concassé	Ballasts usagés chemins de fer	Déchets de déconstruction de bâtiments en mélange	Pneus usagés	Terres de déblais excavées non contaminées acides	Terres de déblais excavées non contaminées alcalines	Déchets verts broyés	Déchets de balayage de rues	Boues papetières	Boues de stations d'épuration	Compost de déchets verts et boues de STEP
		BR	BE	BA	DB	-	TA	TB	DV	DR	SP	BS	CO
Toxicité													
Ecotoxicité terrestre	Vers de terre - Toxicité aiguë	nd	nd	nd	nd	nd	nd	Pas d'évitement	Pas d'évitement	Pas d'évitement	Pas d'évitement	Provoque un évitement dès 25% de boues	Provoque un évitement dès un apport de 50% de compost
	Plantes - Toxicité aiguë et chronique	nd	nd	nd	nd	nd	nd	Emergence : Pas d'effet négatif Biomasse : Pas d'inhibition de croissance	Emergence : Pas d'effet négatif Biomasse : Apport de 12,5% de boues : inhibition de croissance > 30% pour cresson. Pas d'effet négatif pour l'orge	Emergence : Pas d'effet négatif Biomasse : Apport de 12,5% de boues : inhibition de croissance > 30% pour cresson et orge	Biomasse : Apport de 12,5% de boues : inhibition de croissance > 30% pour cresson et orge Emergence : Apport de 12,5% de boues : inhibition > à 30% pour le cresson ; pas d'inhibition dans le cas de l'orge	Apport de 12,5% de boues : diminution > à 30% de l'émergence du cresson et de l'orge	Emergence : Apport de 12,5% de compost : diminution > à 30% de l'émergence du cresson et de l'orge Biomasse : Inhibition de croissance > 30% pour le cresson à partir de 25% d'apport de compost et pour l'orge à partir de 50%
	Vicia faba - Génotoxicité	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ecotoxicité aquatique	Daphnie - Toxicité aiguë	Effets toxiques à partir de 60% de lixiviat et 50% d'immobilisation à partir de 95% de lixiviat	Pas d'immobilisation	Inhibition de croissance	Pas d'immobilisation	nd	nd	Pas d'immobilisation	Effets toxiques à partir de 30% de lixiviat et 90% d'immobilisation à partir de 75% de lixiviat	Effets toxiques à partir de 60% de lixiviat et 35% d'immobilisation à partir de 95% de lixiviat	Pas d'immobilisation	100% d'immobilisation	Effets toxiques à partir de 25% de lixiviat et 100% d'immobilisation à partir de 50% de lixiviat
	Lentilles d'eau - Toxicité chronique	Inhibition de croissance à partir de 25% de lixiviat, pas significative	Possibilité d'inhibition de croissance	Pas d'immobilisation	Inhibition de croissance à partir de 25% de lixiviat, pas significative	nd	nd	Possibilité d'inhibition de croissance	Inhibition de croissance > à 25%, significative à partir de 50% de lixiviat	Possibilité d'inhibition de croissance	Inhibition de croissance > à 25%, significative à partir de 25% de lixiviat	Inhibition de croissance > à 25%, significative à partir de 10% de lixiviat	Inhibition de croissance > à 25%, significative à partir de 25% de lixiviat

Annexe 6 : Caractérisation individuelle des 6 mélanges modèles SITERRE

	Code SITERRE	1	2	3	4	5	6
Unité	**Désignation**	**Terre acide / Compost**	**Brique / Compost**	**Ballast / Déchet rue / Compost**	**Ballast / Boue papier**	**Terre acide / Ballast / Boue STEP**	**Terre acide / Béton / Déchet vert**
		TA/CO	**BR/CO**	**BA/DR/CO**	**BA/SP**	**TA/BA/BS**	**TA/BE/DV**
Propriétés mécaniques (matériau brut)							
%	**Granulométrie < 1 mm**	57,8	37,4	43	nd	25,9	26,8
t/m3	**Masse volumique des grains**	2,69	nd	2,27	nd	2,69	2,69
$\rho\delta_{OPN}$(g/cm^3) / w_{OPN}(%)	**Proctor (5 points)**	1,55 / 20,8	1,12 / 37,9	1,29 / 35,2	1,64 / 22,5	1,89 / 12,9	1,76 / 11,8
Indice (à l'optimum / w(%) à IPI=7)	**IPI**	20,8 / 22,8	18,0 / 43,5	2,43 / 34,4	3,3 / 19,3	13,2 / 14,5	27,5 / >14
	Caractéristiques à l'œil nu	Le mélange est de couleur brune, avec de nombreux graviers, des résidus ligneux plus ou moins grossiers et des particules fines.	Le mélange est de couleur noire, avec des fragments de briques plus ou moins grossiers, des résidus ligneux plus ou moins grossiers et des particules fines.	Le mélange est de couleur noire, avec des ballasts grossiers, des résidus ligneux plus ou moins grossiers et des particules fines. Des développements microbiens blanchâtres sont observés sur les résidus ligneux.	nd	nd	nd

	Code SITERRE	1	2	3	4	5	6
Unité	Désignation	Terre acide / Compost	Brique / Compost	Ballast / Déchet rue / Compost	Ballast / Boue papier	Terre acide / Ballast / Boue STEP	Terre acide / Béton / Déchet vert
		TA/CO	BR/CO	BA/DR/CO	BA/SP	TA/BA/BS	TA/BE/DV
Propriétés agronomiques (structure <2mm)							
	Densité apparente	1,05	0,67	0,68	0,99	1,56	1,21
% massique	Densité réelle	2,49	2,39	2,41	2,66	2,78	2,52
	Humidité	17,4	27,55	35,43	31,17	4,25	6,04
	pF 3	25,8	29,85	42,23	19,47	85,03	16,29
	Granulo sur sol frais : > 5 mm	36,6	42,2	37,6	nd	nd	nd
	Granulo sur sol frais : 2-5 mm	16,6	12,2	31,4	nd	nd	nd
	Granulo sur sol frais : < 2 mm	46,8	45,6	31	nd	nd	nd
	Argile	10	13,4	11,2	12,5	3,5	4,4
	Limons fins	44,2	15,7	12,9	20,7	11,6	16,7
	Limons grossiers	18,4	6,9	10,1	8,7	8,4	10
	Sables fins	10,2	8	18,7	12,6	15,8	13,8
	Sables grossiers	17,2	56	47,1	45,5	60,7	55,1
Propriétés agronomiques (chimie <2mm)							
	pH	7,3	7,4	7,8	8,6	8,2	10,7
g/kg matière sèche	CaCO3 Total	1,3	9	23,6	206	2,2	83,5
	CaCO3 actif	-	-	-	116	-	19
	MO	57,9	158,3	157,7	56,4	12,6	23,4
	C Total	33,8	93,1	94,5	57,5	7,6	23,6
	C Org	33,6	92	91,7	32,8	7,3	13,6
	N total	3,94	8,99	6,71	0,888	0,865	0,488
	C/N	8,5	10,2	13,7	36,9	8,5	27,8
	P Olsen	0,357	0,55	0,549	0,07	0,089	0,064
cmol/kg	CEC Metson	10,9	24,2	18,5	2,43	3,16	4,85
g/kg matière sèche	Si extractible	1,28	1,62	0,79	1,02	1,28	3,2
	Al extractible	1,3	1,16	10,5	5,17	3,37	15,2
	Fe extractible	12,4	16,2	34,7	27,6	11,6	17,8

	Code SITERRE	1	2	3	4	5	6
Unité	Désignation	Terre acide / Compost	Brique / Compost	Ballast / Déchet rue / Compost	Ballast / Boue papier	Terre acide / Ballast / Boue STEP	Terre acide / Béton / Déchet vert
		TA/CO	BR/CO	BA/DR/CO	BA/SP	TA/BA/BS	TA/BE/DV
Eléments majeurs totaux (<2mm)							
%	Matières volatiles (450°C)	12,3	36,8	27	12,9	7,8	4,8
mg/kg matière sèche	Al	77850	39422	39395	40870	84024	91624
	Ca	8027	33775	33168	234875	27913	10583
	Fe	27262	45620	42053	26726	58605	20659
	Mg	2359	5150	8860	12147	14812	2123
	Mn	175	570	586	359	633	83
	P	4308	14348	7768	662	3767	423
	K	26158	17758	13268	2833	18137	27388
	Si	279815	164457	217358	95415	258990	314026
	Na	2472	5161	9884	4665	9078	1862
	Ti	1826	1636	2224	2754	4841	2272
ETMs sur solide (<2mm)							
mg/kg matière sèche	Sb	3,9	7	15	2,5	4,2	2,1
	Ba	475	327	288	70	339	503
	Mo	1,4	4,2	3,7	1,6	2,3	0,9
	Sn	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Se	<1	<1	<1	<1	<1	<1
	Pb	24	46	40	17	18	20
	Zn	112	319	257	54	119	59
	Cr	48	40	56	40	79	50
	Cu	44	134	124	77	63	35
	Cd	0,2	0,5	0,3	0,2	0,2	<0.1
	As	15	25	15	4	15	12
	Hg	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Ni	17	19	24	16	26	18

	Code SITERRE	1	2	3	4	5	6
Unité	Désignation	Terre acide / Compost	Brique / Compost	Ballast / Déchet rue / Compost	Ballast / Boue papier	Terre acide / Ballast / Boue STEP	Terre acide / Béton / Déchet vert
		TA/CO	BR/CO	BA/DR/CO	BA/SP	TA/BA/BS	TA/BE/DV
Lixiviation (<4mm)							
	pH	7,7	7,8	8,0	8,1	7,9	8,1
µS/cm	conductivité	958	2822	1476	315	800	465
mg/kg matière sèche	fraction soluble	9890	13880	25110	3070	4650	3420
mg/kg matière sèche	Al	340	28	25	3	5,1	12
	Ca	270	1389	840	704	423	536
	Fe	511	137	102	4,4	11	16
	Mg	75	329	203	49	106	49
	Mn	1,8	3,3	2,7	0,2	4,1	0,5
	P	46	77	58	3,7	46,0	5,6
	K	1055	3439	1923	67	298	406
	Si	460	112	92	27	52	114
	Na	234	720	469	65	126	49
	S	412	2324	708	85	173	260
	Ti	9,8	0,7	0,7	0,40	0,1	0,3
	Sb	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Ba	0,8	0,6	0,5	0,2	<0,05	0,2
	Mo	0,36	1,4	0,40	0,07	0,25	0,04
	Sn	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Se	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Pb	0,2	0,2	0,2	<0,05	<0,05	<0,05
	Zn	1,5	2,2	1,7	0,1	0,1	0,05
	Cr	0,6	0,1	0,1	<0,05	<0,05	<0,05
	Cu	0,8	1,1	0,9	0,4	0,3	0,1
	Cd	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	As	0,6	0,7	0,4	<0,05	0,3	0,1
	Hg	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Ni	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	<0,05
	Cl-	485	1470	1053	70	173	101
	F-	2,5	4,1	1,75	0,7	78	2,5
	SO43-	1062	6587	1900	189	422	786
	NO3-	524	942	1515	264	25	4,6
	NO2-	657	1763	0,5	3	0,3	0,2
	PO43-	81	104	105	3,9	37	13
mg C/kg matière sèche	COT	1700	4240	2440	547	2160	714
mg/kg matière sèche	hydrocarbures (C10-C40)	<1	<1	1,2	<1	<1	<1
	indice phenol	0,23	0,2	0,13	<0,10	19	<0,1

	Code SITERRE	1	2	3	4	5	6
Unité	Désignation	Terre acide / Compost	Brique / Compost	Ballast / Déchet rue / Compost	Ballast / Boue papier	Terre acide / Ballast / Boue STEP	Terre acide / Béton / Déchet vert
		TA/CO	BR/CO	BA/DR/CO	BA/SP	TA/BA/BS	TA/BE/DV
Toxicité							
Ecotoxicité terrestre (pour 100% de produit brut testé en mélange au sol)	orge-émergence % d'inhibition	100,0	100,0	100,0	76,9	89,7	35,9
	orge-nbre pl récolte % d'inhibition	22,5	42,5	-70,0	5,0	35,0	-12,5
	orge-MS % d'inhibition	83,5	78,5	52,2	68,0	62,0	65,0
	cresson-émergence % d'inhibition	100,0	100,0	100,0	69,9	88,0	23,3
	cresson-nbre pl récolte % d'inhibition	100,0	100,0	37,5	2,5	95,0	-30,0
	cresson-MS % d'inhibition	100,0	100,0	88,8	86,1	92,4	79,2
	vdt-mortalité % d'inhibition	100,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0
	vdt-évitement % d'inhibition	100,0	93,0	97,0	-80,0	98,0	30,0
Ecotoxicité aqutique	daphnie-% immobilisation (pour 90% d	50	90	10	0	0	0
	algue-% inhibition de croissance (pour	18	20	-2	33	7	0
	Lemna-% inhibition de croissance (nb	-27	-16	-9	5	13	2
	Lemna - % inhibition de croissance (st	-5	18	-6	6	14	2