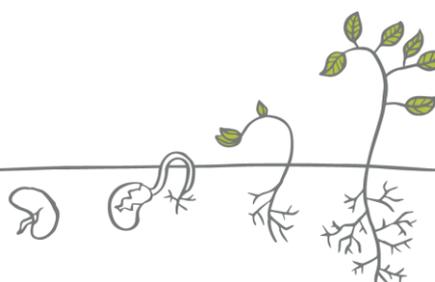


16/02/2016

ÉTUDE DES SUBSTRATS ET DE L'HYDROLOGIE DES TOITURES VEGETALISEES DU CANTON DE GENEVE

[Fiche de synthèse]



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

Hes·SO

Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale

Fachhochschule Westschweiz

University of Applied Sciences and Arts
Western Switzerland

TITRE :

 tude des substrats et de l'hydrologie des toitures végétalisées du canton de Genève

AUTEUR :

Marie FOURNIER, assistante HES, Dr Pascal BOIVIN, professeur HES

THEMATIQUES :

Agronomie - Sols urbains - Conduite des végétaux, Choix des végétaux et innovation végétale

MOTS-CLES :

Toitures végétalisées, substrats, hydrologie, Genève

RESUME :

Face à une urbanisation croissante, le développement durable, la protection de la biodiversité et la qualité de vie sont des thématiques fortes dans les projets d'urbanisme et d'architecture. Les toitures végétalisées font partie des mesures sollicitées, Genève en compte aujourd'hui plus de 300. Ce projet s'intègre dans cette thématique avec pour objectif un suivi de toitures végétalisées préexistantes en ville de Genève. Le volet substrat et hydrologie propose une caractérisation hydrodynamique et physique des substrats sélectionnés (substrats neufs et substrats de toitures), ainsi qu'une quantification des rétentions en eau et des écoulements par des mesures hydrodynamiques locales et un suivi temporel des réserves en eau.

Pour le fonctionnement hydrologique, 5 toitures extensives ont été suivies en continu durant la période de végétation 2015 d'avril à septembre. Les mesures de débits ont été réalisées via la mise en place de déversoirs en V cylindriques développés à cette fin et placés directement dans les bouches d'évacuation sur le toit. Trois sondes watermark[®], analysant l'état hydrique du substrat, ont été installées à différentes profondeurs.

Les toitures extensives étudiées abattent de 45 à 63 % des précipitations reçues, démontrant leur intérêt dans la gestion des eaux urbaines. L'évapotranspiration réelle (ETR) a également pu être estimée, avec une moyenne mesurée à 1.48 mm jour⁻¹.

Vingt-huit substrats de toitures ainsi que 4 substrats neufs ont pu être étudiés au travers d'analyses chimiques (capacité d'échange cationique, carbone et azote organique, rapport C/N, matière organique, pH et analyses de fertilité (P, K, Mg, Ca) et d'analyses physiques (granulométrie, rétention en eau, porositt ). Ces dernières, réalisée via les protocoles des associations professionnelles (ASVE, ADIVET) ont été confrontées à des mesures de laboratoire plus précises (désorption en continu). Il semble que les protocoles standards introduisent des biais peu explicables et doivent être révisés. Une rétention en eau plus importante pour les substrats à bases de tuiles a été constatée, tant pour les éléments grossiers que pour la terre fine. On constate une évolution des propriétés des substrats au cours du temps. La rétention en eau des substrats neufs est beaucoup plus élevée. Les substrats évolués présentent une agrégation qui devra être plus finement analys e pour mieux en comprendre les propriétés. Ces évolutions sont liées à celle de la matière organique dont la teneur ne chute généralement pas avec le temps, mais dont la qualité évolue.

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	5
2	MATÉRIEL ET MÉTHODE	6
	2.1 CARACTÉRISATION DES SUBSTRATS	6
	2.1.1 �chantillonnage	6
	2.1.2 Structure et propriétés analytiques	7
	2.2 BILAN HYDROLOGIQUE DE TOITURE	10
	2.2.1 Toitures extensives:	10
	2.2.2 Toitures intensives	10
	2.2.3 Bilan hydrologique	10
	2.2.4 évapotranspiration réelle (ETR).....	11
3	RÉSULTATS ET DISCUSSION	11
	3.1 CARACTÉRISATION DES SUBSTRATS	11
	3.1.1 Analyses chimiques.....	11
	3.1.2 Analyses physiques	13
	3.1.3 Bilan hydrologique	20
	3.1.4 évapotranspiration réelle et potentielle.....	23
	3.2 DIAGNOSTIC D'ÉVOLUTION DES SUBSTRATS	27

CONCLUSION ET PERSPECTIVES	28
RÉFÉRENCES.....	29
ANNEXES I : ANALYSES CHIMIQUES	31
ANNEXE II : GRANULOMÉTRIE	33
ANNEXE III : CUMUL DES DÉBITS	35

1 INTRODUCTION

Face à une urbanisation croissante des milieux urbains (évaluée à 83 % en 2030 (Antrop, 2004)), le développement durable, la protection de la biodiversité et qualité de vie sont des thématiques fortes dans les projets d'urbanisme et d'architecture. C'est notamment ce que la ville de Genève vise à encourager au travers de la mise en place de son programme *nature en ville*. Les toitures végétalisées font partie des mesures sollicitées. Genève compte aujourd'hui plus de 300 toitures végétalisées (Massy et al., 2011).



De nombreuses études ont mis en lumière les bénéfices des toitures végétalisées : réduction du volume de ruissellement, réduction de la pollution de l'air, rafraîchissement de l'air, augmentation de la biodiversité et amélioration visuelle et sonore du cadre de vie. La mise en place de toits verts permettrait notamment de renforcer le bilan thermique estival des bâtiments, induisant des économies d'énergie. Sachant que l'immobilier représente 47% des besoins totaux en énergie en Suisse (Saadatian et al., 2013), la mise en place de toits verts devient à ce seul titre une stratégie à considérer.

En créant des lieux où l'eau peut être temporairement stockée puis évaporée, les toitures végétalisées permettent la réduction des écoulements évitant une surcharge des réseaux d'eaux claires et participent à la régulation des débits de pointe (Berretta et al. 2014). Selon la littérature, les toitures végétalisées réduisent de 30 à 86 % le volume des eaux de ruissellement, limitent le débit de pointe de 22 à 93 % et le retardent de 0 à 30 minutes. Ceci dépend évidemment des différents paramètres de la toiture et de l'environnement: volume de précipitations, conditions antécédentes, nature et épaisseur du substrat, espèces de plantes et pente de la toiture (Li et al., 2014, Mentens et al., 2006). De par les nombreuses variables en jeu dans l'efficacité de la rétention d'eau, il est difficile de prédire la performance hydrologique d'une toiture. De nombreuses études mettent en avant l'épaisseur du substrat comme étant la caractéristique essentielle déterminant le comportement hydrique d'une toiture (FLL, 2008). Cependant, la composition de ce dernier pourrait avoir un effet plus significatif (Graceson et al., 2013). Deux aspects interviennent dans l'appréciation des propriétés hydriques du substrat : l'impact sur les écoulements (hydrologie), et la capacité de rétention d'eau utile à la végétation, soit la réserve en eau (agronomie). L'évapotranspiration est un facteur important affectant la vitalité et la performance des toitures végétalisées. Les différentes études montrent des valeurs de 1 à 3 mm par jour (sur toitures extensives) en fonction des conditions climatiques (Marasco et al., 2015). La réserve en eau assurée par un substrat est à confronter à ces valeurs et à la météorologie locale.

Bon nombre des fonctions d'une toiture végétalisée dépendent du substrat: régulation thermique, végétation, biodiversité accueillie, évapotranspiration, etc. Il remplit le rôle d'un sol artificiel permettant l'ancrage des racines tout en fournissant l'eau, les nutriments et un environnement favorables aux plantes. Il doit être léger, stable, aéré et capable de drainer l'eau aisément (Ampin et al., 2010). Les substrats de toitures sont souvent un mélange d'éléments naturels (argile, sable, lave) et artificiels (perlite, vermiculite), avec des matériaux recyclés (brique, tuile, béton) et de la matière organique (MO) (compost, tourbe). Les éléments grossiers forment un squelette autoporteur. Les éléments fins et la MO doivent jouer un rôle de rétention d'eau et de nutriments. Des guides de recommandations quant aux différentes caractéristiques de substrats à utiliser ont été formulés en Allemagne (FLL, 2005), en France (ADIVET, 2007) et en Suisse (ASVE 1999).

Les études sur les toitures végétalisées sont en majeure partie réalisées sur des prototypes conçus pour l'expérience. Le substrat est donc neuf. Or diverses caractéristiques sont susceptibles d'évoluer au cours du temps. Les matières organiques fraîches vont se dégrader et évoluer, une agrégation peut se développer et la fraction grossière (< 2 mm, le squelette) est susceptible de se réorganiser. Tous ces changements peuvent affecter la fertilité et le comportement hydrique du substrat. Pourtant, très peu d'études, à notre connaissance, sont réalisées directement sur des toitures relativement anciennes (Speak et al., 2013, Marasco et al., 2015). Si l'on cherche à connaître l'impact environnemental des toitures végétalisées, et si les propriétés du substrat évoluent, cette lacune doit être comblée. Notre recherche se déroule donc sur des toitures végétalisées de différents âges.

Les objectifs de cette étude sont :

- Une caractérisation agronomique, hydrodynamique et physique comparée des substrats (neufs et anciens prélevés sur les toitures sélectionnées) ;
- Une discussion de ces observations en fonction de l'épaisseur et de l'ancienneté de substrat ;
- Une caractérisation de l'évolution des matériaux organiques avec le temps et mise en relation avec l'hydrologie, la fertilité, et les associations végétales et faunistiques hébergées ;
- Une analyse critique des protocoles de caractérisation physique des substrats proposés par les associations professionnelles.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 CARACTÉRISATION DES SUBSTRATS

2.1.1 ÉCHANTILLONNAGE

Toutes les toitures extensives (de plus et moins de 10 ans) sélectionnées pour l'étude ont été échantillonnées après vérification de l'homogénéité du substrat sur la toiture. Un échantillon moyen de 10 litres a été prélevé selon les recommandations ASVE (1999) et Guerin et al. (2014). Des échantillons non remaniés ont également été prélevés lorsque la texture du substrat le permettait.

Sur les toitures intensives sélectionnées par l'étude (plus et moins de 10 ans), après vérification de l'homogénéité, trois échantillons non remaniés ont été prélevés. Lorsque le substrat (trop grossier) ne le permettait pas, se sont 2 à 3 litres de substrat qui ont été échantillonnés.

Plusieurs échantillons de substrats neufs nous ont été fournis par diverses entreprises de verdissement de toitures :

- Ricoter : 193 (intensif ; pouzzolane)
- Ricoter : 132 (extensif, pouzzolane)
- ZinCo : Sedumtepish (extensif ; tuile)
- Weiss + appetito : W+A toits vert plus (extensif ; tuile)

L'historique des toitures végétalisées est très difficile à obtenir. Les informations sur la composition du substrat ainsi que sur l'entreprise ayant réalisé la toiture est peu, voire pas accessible. Néanmoins, dans cette étude, trois toitures sélectionnées ont trouvé leur correspondant en substrat neuf permettant une comparaison. Il s'agit de :

- › HEAD / Weiss+apetito
- › Pavillon de l'enfance/ ZinCo
- › Espace Hippomène/ Ricoter extensif

2.1.2 STRUCTURE ET PROPRIÉTÉS ANALYTIQUES

Les analyses chimiques et physiques ont été réalisées sur toutes les toitures sélectionnées dans le cadre de l'étude, soit 28 substrats (intensifs comme extensifs). Les 4 substrats neufs ont également fait l'objet d'analyses.

Analyses chimiques

Les analyses chimiques suivantes ont été réalisées sur la fraction fine (< 2 mm) de chaque substrat après tamisage. Les protocoles utilisés pour les trois premières analyses ci-dessous sont les méthodes fédérales prescrites par l'Agroscope.

- pH (H2O 1 :2.5)
- Matière organique (MO) par oxydation
- Analyses de fertilité (P, K, Mg, Ca)
- Carbone organique par calcination
- Azote organique selon le protocole de Kjeldahl
- Capacité d'échange cationique (CEC) selon la méthode au chlorure de cobaltihexamine

Analyses physiques

Courbes granulométriques

Les courbes granulométriques des substrats ont été réalisées par tamisage afin d'obtenir la distribution de taille des particules. Pour se faire, les échantillons de substrat sont séchés à l'étuve (40°) durant 48 heures, puis tamisés dans une tour de tamis selon les 8 seuils de tamisage décrits dans les normes FLL (2008) : 0.04 ; 0.063 ; 0.125 ; 0.5 ; 1 ; 2 ; 4 et 6.3 mm. Par convention, dans ce qui suit, on appellera « terre fine » la fraction inférieure à 2 mm et « fraction grossière » la fraction supérieure à 2 mm.

Rétention en eau

Protocole ASVE et ADIVET – présentation et analyse critique

Les protocoles proposés par l'Association Suisse des spécialistes du Verdissement des Edifices (ASVE), ainsi que par l'Association des toitures Végétales (ADIVET, France) ne s'appliquent qu'aux substrats de toitures extensives.

Le protocole ASVE permet la mesure des volumes de la macroporosité (LK) et de la capacité utile de rétention d'eau (nFK). Les mesures se font par la différence de poids d'un échantillon sec à 105° (g3) et son état après mise en saturation par immersion de 15 minutes (LK) (g1) puis ressuyage de 2 à 4h (nFK), jusqu'à l'atteinte d'un poids constant (g2). Selon l'ASVE, la nFK doit être ≥ à 20 %, et la LK ≥ à 40 % du volume.

La macroporosité (LK) et la capacité utile de rétention d'eau (nFK) en % volumique sont calculées de la manière suivante :

$$nFK = (g2-g3)/p/VBA \cdot 100 \quad \text{eq.1}$$

$$LK = (g1-g2)/p/VBA \cdot 100 \quad \text{eq.2}$$

Avec p: densité de l'eau (1g/cm³) et VBA le volume du système en cm³.

L'ASVE distingue la capacité utile de rétention d'eau (nFK) de l'eau totale disponible pour les végétaux (rWK, % volume) qu'elle calcule de la manière suivante :

$$rWK = LK + nFK \quad \text{eq.3}$$

Les normes de rWK se définissent en fonction de la moyenne des précipitations, qui dans le canton de Genève varient entre 800 et 1000 mm par année. Dans ce cas, l'ASVE préconise une rWK ≥ 60 % (vol.).

Le terme de capacité utile de rétention en eau utilisé ici par le protocole ASVE diffère de la définition agronomique, normalement définie comme étant la quantité d'eau restituable aux végétaux après la phase de drainage gravitaire. Selon le protocole ASVE cette définition se réfère donc à la rWK et non pas à la nFK. La définition de rWK comme eau utile pour les végétaux est étonnante puisque la part (LK) va effectivement s'écouler rapidement. Elle donne des résultats contradictoires avec les concepts agronomiques, puisque l'eau disponible rWK sera supérieure à l'eau retenue nFK. Enfin, la valeur g₃ - sec à 105°C détermine le point sec, limite inférieure selon ASVE de l'eau utile aux plantes (rWK) ce qui n'est pas non plus réaliste. Cette température correspond à des potentiels de milliers de bars de succion, les plantes n'exploitant que 15 bars au maximum. L'ASVE a peut-être supposé que l'écart entre la valeur de teneur en eau à 15 bars et celle à 105°C était négligeable dans ce type de matériau, ce qui reste à démontrer.

Le protocole ASVE permet également une mesure de la porosité du substrat (P) selon la formule suivante :

$$P = (g_1 - g_3) / VBA \cdot 100 \quad \text{eq.4}$$

Le protocole ADIVET propose, au même titre que le protocole ASVE, une mesure de la quantité d'eau retenue par les matériaux constitutifs (capacité maximal en eau – CME) exprimée en % du volume, avec un temps de saturation par immersion de 24h et d'un temps de ressuyage de 2h.

Le protocole ADIVET se dit « applicable au complexe complet de végétalisation ou isolément à chacun des matériaux constitutifs ». Ainsi, ce protocole a été choisi pour mesurer la capacité maximale de rétention en eau des éléments grossiers uniquement, tandis que le protocole de l'ASVE a été choisi pour l'ensemble du substrat, car le mieux détaillé.

Le protocole ASVE recommande un échantillon de 10 litres pour la réalisation des mesures. Ce qui n'est pas le cas du protocole ADIVET qui ne préconise aucun volume défini pour l'expérimentation. Selon Guerin et al. (2014), le volume d'échantillon, pour être représentatif, doit être défini selon la taille maximale des éléments grossiers (**Tableau 1**). Dans cette étude, la taille des éléments grossiers varient entre 2 et 3 cm. Se sont donc 10 litres de substrat qui ont été prélevés pour la réalisation des mesures de rétention en eau selon le protocole ASVE (Figure 1). Pour cette même raison il n'a pas été possible de réaliser aucun réplicas.

Tableau 1 : Quantité minimale de matière à prélever selon la taille des composants.

Taille maximale des composants	Quantité minimale de matière à prélever	
10 cm	100 kg	} Prélèvement dans le terrain
5 cm	30 kg	
2 cm	5 kg	
1 cm	1.5 kg	
2.5 mm	100 g	} Traitement des échantillons en laboratoire
1.5 mm	20 g	
1 mm	5 g	
< 0.1 mm	1 g	



Figure 1. Cylindre utilisés pour la réalisation du protocole ASVE

Enfin, les protocoles ASVE et ADIVET proposent des outils de mesure de rétention en eau sur des échantillons de substrat remaniés. Cependant, le remaniement modifie certaines caractéristiques du substrat comme l'agrégation et l'empilement de la fraction grossière, influençant de ce fait la porosité et la rétention en eau. Nous avons donc voulu également réaliser des analyses sur échantillon non remanié via la méthode des courbes de désorption.

Courbes de désorption

Cette méthode permet la mise en relation du potentiel matriciel (h) avec la teneur en eau de l'échantillon (W). La mesure est faite en continu (de 0 à 1 bar) sur des volumes de 150 cm³ environ. La prise de mesure se fait toutes les 5 minutes. Tous les échantillons sont saturés à un potentiel de -10 mbar avant le début de la mesure et cette dernière est effectuée jusqu'à poids constant (Figure 2A).

Les courbes de désorption ont été réalisées sur 1) échantillons non remaniés, 2) échantillons remaniés, 3) terre fine (<2mm) et 4) éléments grossiers (>2mm) de substrats intensifs comme extensifs.

Une méthode de mesure originale a dû être développée afin de mesurer la rétention en eau des éléments grossiers. Pour ce faire, ces derniers sont inclus dans un lit de microbilles pré calibrées (Figure 2B). La courbe de désorption ainsi obtenue est soustraite à la courbe de désorption des microbilles. Cette dernière a un aspect typique, la désorption se déroulant à un potentiel précis, correspondant au rayon des pores entre les billes (selon la relation : $\text{rayon pores } (\mu\text{m}) = 0.15 * 10^{-4} \div h \text{ (mbars)}$). On obtient ainsi, la courbe de désorption des éléments grossiers seuls. Cette méthode a été réalisée sur des éléments grossiers utilisés le plus couramment sur les toits, à savoir la tuile et la pouzzolane (3 répétitions).

A partir des données de rétention en eau de la terre fine et des éléments grossiers, une reconstitution des courbes du substrat complet a été entreprise en additionnant les courbes terre fine + grossiers. Dans ce qui suit, ces courbes seront appelées courbes reconstituées (rec.).

Le calcul de la porosité totale (% vol.) est mesuré sur les courbes d'échantillons non remanié et reconstitué, multiplié par la densité apparente des échantillons (mesurée au laboratoire-méthode de la poche plastique). La porosité est définie comme la teneur en eau à saturation (cm³), soit à un potentiel de -10 mbars.



Figure 2.A : Courbe de désorption : matériel de mesure, B : désorption des éléments grossiers (> 2 mm) inclus dans un lit de microbilles)

2.2 BILAN HYDROLOGIQUE DE TOITURE

Sur 10 toitures pré sélectionnées, seules 6 ont pu être étudiées en raison des contraintes d'équipement. Il s'agit de :

2.2.1 TOITURES EXTENSIVES:

- Bâtiment de la HEAD
- EMS de la Rive
- EMS des Marronniers
- Ecole de l'Europe
- HUG

2.2.2 TOITURES INTENSIVES

- Collège de la Seymaz

Quatre autres toitures avaient été sélectionnées pour un suivi hydrologique. Il s'agissait de l'école des Petites Fontaines dont le réseau d'évacuation des eaux de toitures se trouve raccordé à un autre réseau inconnu ne permettant pas la mesure des débits de la toiture. La piscine d'Onex, la toiture des HUG extensive ainsi que l'école du Petit Senn avaient également été sélectionnées. Ces dernières présentent des problèmes de mise en place du matériel de mesure de débit (évacuations trop peu accessibles).

Les éléments grossiers composant le substrat des 5 toitures étudiées diffèrent : la toiture de la HEAD ainsi que l'EMS de la RIVE sont composés d'un seul type d'éléments grossiers, à savoir la tuile. La toiture de l'EMS des Marronniers est principalement composée de pouzzolane. Quant aux substrats de toitures de l'Europe et des HUG, ils sont composés d'un mélange de plusieurs types d'éléments grossiers (principalement pouzzolane et argile concacée).

2.2.3 BILAN HYDROLOGIQUE

De par la grande difficulté d'accéder aux évacuations des eaux de toitures des bâtiments, les mesures de débit sont déterminées via la mise en place de déversoirs en V (rectangulaires ou cylindriques, Figure 3) développés pour ce travail et directement placés dans les évacuations de la toiture. Les débits sont ensuite mesurés à partir de la hauteur d'eau dans le déversoir par une sonde pression (Hobo water level logger U20-001-04, Onset). Les données sont prises toutes les 5 minutes. Un système de mesure équivalent au système cylindrique développé est décrit dans la littérature (Speak *et al.*, 2013).

Pour des questions pratiques et de sécurité, la mesure de débit ne se fait que sur une seule des bouches d'évacuation d'eau de la toiture. Le débit mesuré est donc partiel (Q_{par}). Le débit total (Q_{tot}) est ensuite calculé en prenant en considération la surface du bassin versant drainé. Pour cela, on utilise de longues périodes où pluies et débits sont stabilisés avec substrat saturé (données watermark®, voir ci-dessous). Les débits de sortie sont alors équivalents à ceux des précipitations sur l'ensemble de la toiture. Ainsi, durant ces périodes, le rapport pluie totale/débit mesuré nous permet d'obtenir la fraction de pluie récupérée par la bouche ce qui nous donne le facteur multiplicateur pour le calcul du débit total de la toiture.



Figure 2. Déversoir cylindrique pour mesure de débit sur toiture

Le C.O de la Seymaz était déjà équipé d'un système de mesure mis en place par le département de l'environnement, des transports et de l'agriculture (DETA) (REF). Ces données ne seront pas traitées ici (Cf Analyse de l'efficacité hydrologique d'une toiture végétalisée, Consuegra *et al.*, (2016)).

En plus des mesures de débits, il avait été prévu d'installer des pluviomètres sur les toitures étudiées. Ceci n'a pas pu être réalisé pour des questions pratiques et financières (accès difficile à l'électricité et manque de

matériel). Seule la toiture de la HEAD fut équipée d'une station météo complète nous permettant d'avoir des données de pluviométrie. Ces données ont été utilisées pour les toitures suivantes : école de l'Europe, HUG et HEAD. Ce sont les données de Météo Suisse qui ont été utilisées pour l'EMS des Marronniers (Station Jussy) et d'Agrométéo pour l'EMS de la Rive (Station Bernex).

L'état hydrique du substrat (potentiel matriciel (h) de 0 à 200Cbars) est également mesuré toutes les heures par 3 sondes watermark® positionnées (si la hauteur de substrat est suffisante) à différentes profondeurs.

2.2.4 ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE (ETR)

Le suivi hydrologique de toiture nous permet également la détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR). Pour ce faire, nous utilisons les périodes sans précipitation ni écoulement, les mesures de sonde Watermark® (potentiel matriciel -h- du substrat) et leur conversion en teneur en eau (W) via l'établissement de la courbe de désorption au laboratoire. Les données d'ETR seront confrontées aux mesures d'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée par la formule de Penmann –Monteith (FAO : Smith et al., 1992) calée avec les données mesurées par l'équipe thermique et celle de Météo Suisse, dans les cas où les substrats sont suffisamment humides (moins de 1 bars de succion). Rappelons que l'ETP calculée selon l'équation de Penmann-Monteith FAO ne prend pas en considération l'état hydrique du sol et est une mesure de référence pour un couvert végétal de type gazon.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 CARACTÉRISATION DES SUBSTRATS

3.1.1 ANALYSES CHIMIQUES

Le tableau des résultats des analyses chimiques des 28 toitures (extensives et intensives) ainsi que des substrats neufs est présenté en Annexe I. Ces résultats sont présentés en références pondérale à la terre fine et non au pourcentage total sur la toiture.

Ces résultats nous montrent des valeurs de pH en moyenne neutres (7.1), variant pour les toitures extensives de 5.9 pour la piscine d'Onex à 7.9 sur la toiture de l'espace Hippomène. Les pH sur toitures intensives varient dans une gamme moins large, de 6.2 pour les HUG à 7.5 pour l'école du Petit Senn. Les moyennes de pH entre toitures extensives et intensives sont identiques à savoir 7.1. Les moyennes de pH ne diffèrent pas entre les substrats neufs (7.3) et les plus anciens (7.1). Aucune différence n'est à relever entre substrat tuile et pouzzolane. Les gammes de pH recommandées par la FLL pour les toitures extensives se trouvent entre 6.5 et 8 et entre 5.5 et 8 pour les toitures intensives. Généralement, se sont dans ces valeurs que les nutriments sont disponibles pour les plantes (pH de 5.5-7 (Ampin et al., 2010)). Les toitures étudiées dans le cadre de cette étude se trouvent donc en moyenne dans les gammes recommandées.

Le taux de matière organique oscille entre 0.7 et 12.7 %. La moyenne sur les toitures extensives est de 4.7 % avec un minimum de 0.7 % mesuré sur la toiture MQ Huttins et un maximum à 10.4 % sur les HUG. La moyenne des toitures extensives est sensiblement plus élevée avec un taux de 6.3 %. Le maximum de 12.7 % et le minimum de 2.7 % sont respectivement mesurés sur les toitures de l'école du Petit Senn et la toiture des HUG. Le taux de MO recommandé par la FLL est de 6-8% pour les toitures extensives et de 6-12% pour les toitures intensives. Les valeurs trouvées sur les toitures de l'étude sont légèrement en dessous des normes préconisées.

De ce point de vue, les substrats extensifs, diffèrent fortement des sols naturels (non cultivés), pour lesquels la teneur en matière organique est assez bien corrélée à la teneur en argile. De toute évidence, la matière organique n'est pas organisée ici en association organo-minérale, similaire à celle des sols, sinon les teneurs seraient beaucoup plus faibles.

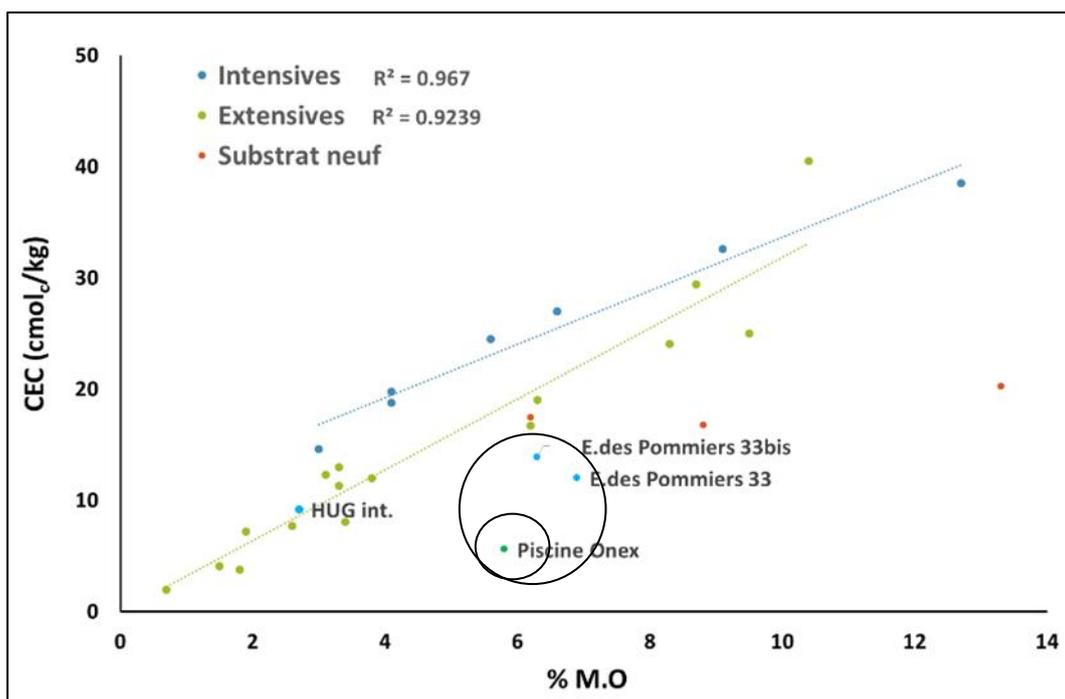


Figure 4. Corrélation entre la matière organique (MO) et la capacité d'échange cationique (CEC) sur toitures intensives (bleu), extensives (oranges) et substrat neuf (orange).

La principale source de capacité d'échange cationique (CEC) dans les substrats de toitures est la matière organique (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La CEC est expliquée à 92 % par la matière organique pour les toitures intensives (R^2 : 0.9239) et à 96 % pour les toitures extensives (R^2 : 0.967). Les toitures intensives à fraction minérale grossière (Pommiers 33/33bis et HUG urgence pédiatrique) se trouvent bien en dehors de la régression linéaire. Ces toitures ont certainement une matière organique non humifiée et pas/peu d'activité biologique. Nous ne trouvons aucun effet du pH sur la CEC, probablement dû aux constituants minéraux qui ne sont pas réactifs.

Aucun réplica n'a été réalisé sur les analyses chimiques. De ce fait, les résultats présentés ne reflètent pas une moyenne sur la toiture, bien que l'homogénéité ait été contrôlée avant échantillonnage. Néanmoins, on ne note pas d'augmentation ni de diminution effective de la teneur en matière organique sur les toitures de la HEAD ni sur celle du Pavillon de l'Enfance par rapport au substrat d'origine (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Seule la toiture de l'espace Hippomène présente une nette diminution du taux de MO, du carbone organique et de la CEC par rapport au substrat d'origine (s'il correspond bien au Ricoter extensif 132). Notons que cette toiture n'a pas de pente (0 %). Le substrat en place se sature très rapidement créant un milieu très peu oxygéné et hydromorphe.

Tableau 2. Comparaison entre substrats neufs et substrats toitures, propriétés chimiques

Toitures/ Analyses	1		2		3	
	HEAD	Weiss+	Pav.Enfance	ZinCo	Hippomène	Ricoter ext.
pH	7.9	7.6	7.2	7.1	7.9	7.2
M.O	9.5	8.8	6.3	6.2	2.6	13.4
C org %	6	5.8	4.6	4.5	2.3	7.5
CEC	25	16.8	19	17.5	7.7	20.3

Nous pouvons voir au travers de ces différentes analyses, que les toitures extensives se situent globalement dans les normes en termes de propriétés chimiques. Il est intéressant de voir que la CEC est à plus de 90% expliquée par la matière organique sur les toitures intensives et extensives, indépendamment de l'âge de

toitures, ce qui n'est de loin pas le cas des substrats neufs, car la matière organique n'est, à ce stade, pas humifiée. La comparaison entre substrat neuf et ancien est délicate. Dans leur étude, Getter et al. (2007) ont comparés le taux de matière organique d'un substrat neuf extensif au même substrat après 5 ans sur un toit végétalisé. Les résultats montrent un taux de matière organique ayant doublé, passant de 2.33 à 4.25 %. Ceci n'est pas le cas dans cette étude. Il serait intéressant de renouveler l'expérience avec un échantillon de substrat neuf, récolté directement lors de sa mise en place sur la toiture. Il est en effet probable que la composition du substrat varie entre la sortie de l'usine et sa mise en place.

Les observations réalisées montrent que (i) les teneurs en matière organique restent élevées, (ii) mais la forme organique et donc la CEC ont changé et (iii) certaines toitures peuvent perdre beaucoup de MO.

3.1.2 ANALYSES PHYSIQUES

Granulométrie

En Annexe II se trouve le tableau récapitulatif de granulométrie par tamisage pour toitures extensives et intensives ainsi que des substrats neufs.

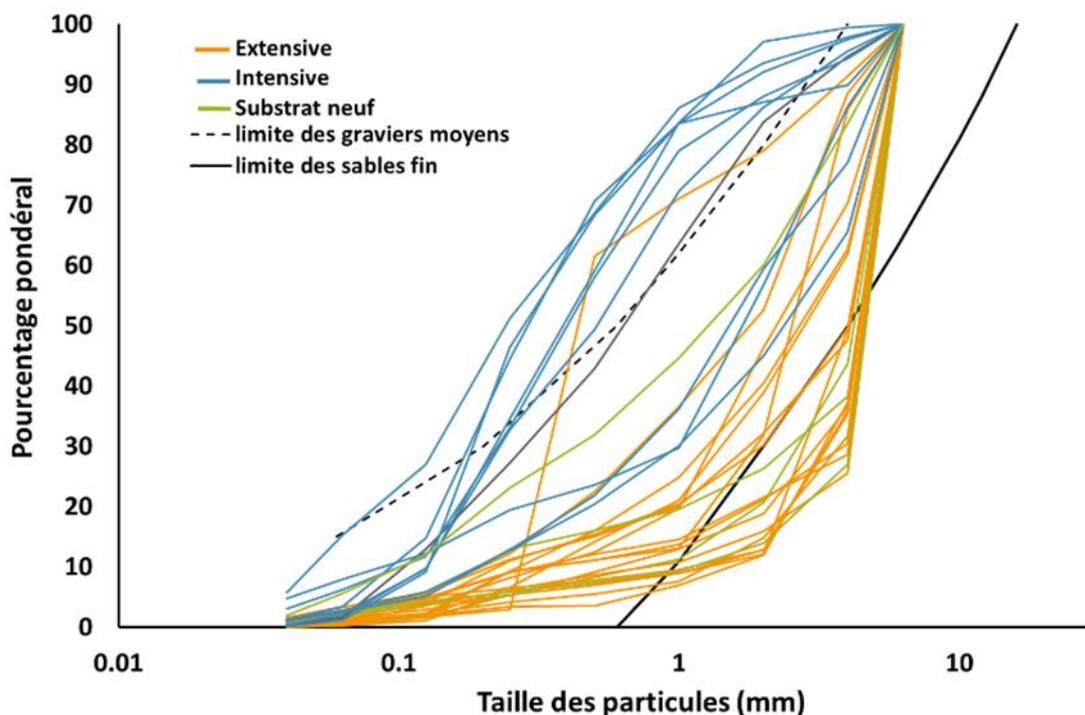


Figure 5. Courbes granulométriques selon la taille des particules (mm) et le pourcentage cumulé. En orange les toitures extensives, en bleu les intensives. En tirets, la limite des sables fins et en noir, celle des graviers moyens selon les normes FLL (2008).

Nous notons une différence bien marquée entre toitures extensives et intensives (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les toitures extensives se démarquent par une bien plus grande concentration d'éléments grossiers, avec une moyenne de 80 % versus 37 % sur les toitures intensives. Le pourcentage total en éléments grossiers est plus élevé pour les substrats tuile avec une moyenne à 90 % que les substrats à base de pouzzolane qui trouvent leur moyenne à 76 %.

Pour les toitures extensives, les normes FLL préconisent 1) une proportion d'éléments inférieurs à 63 μm ne devant pas dépasser 15 % et 2) une proportion d'éléments supérieurs à 4 mm inférieure à 50%. Dans notre cas, la première condition est bien respectée sur l'ensemble des toitures extensives avec une proportion d'éléments < à 63 μm en moyenne de 0.8 %. La deuxième recommandation est, elle, beaucoup moins respectée. Sur les 20

substrats de toitures extensives (dont 3 neufs), 1 seul substrat répond aux normes proposées avec une proportion d'éléments < 4 mm de 47.4 %. Cette toiture est celle de l'Europe. Tous les autres substrats ont des valeurs > 50 % avec un maximum de 87.15 % mesuré sur la toiture de l'EMS de la Rive. Aucune des deux exigences ne sont remplies chez les substrats neufs étudiés ici. Notons le cas particulier de la toiture des HUG qui se démarque des autres toitures extensives avec un pourcentage d'éléments grossiers de 28.7 % et 71.3 % de terre fine. Le nom respect de cette exigence devrait se manifester sur la porosité grossière, plus élevée.

Propriétés hydriques

Porosité du substrat

La porosité mesurée sur l'ensemble du substrat via le protocole ASVE sur les toitures extensives est présentée dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** La mesure ASVE est comparée, lorsque possible, aux mesures de porosité faites via les courbes de désorption (substrat non remanié-vert- ou reconstitué-orange-).

La moyenne de porosité selon l'ASVE est de 43% (v/v) avec un minimum de 33% et un maximum à 55 % pour respectivement la toiture de la HEAD et les HUG. On ne décèle pas de différences de porosité entre les substrats à base de tuile ou de pouzzolane. De larges écarts sont même à relever entre les porosités d'un même type de substrat. Prenons l'exemple des mesures sur les substrats tuile de la HEAD et de l'EMS de la Rive avec des porosités variant de 53.12 % (v/v) pour Rive versus 32.62 % (v/v) pour la HEAD.

Ces différences ne sont pas autant marquées selon les mesures sur les courbes de désorptions. Les substrats tuile ont une porosité similaire variant de 28 à 32 % (v/v). Dans l'ensemble, on observe une forte surestimation de la porosité par le protocole ASVE.

La différence entre les deux mesures provient certainement d'un remaniement du substrat qui introduit une porosité supplémentaire.

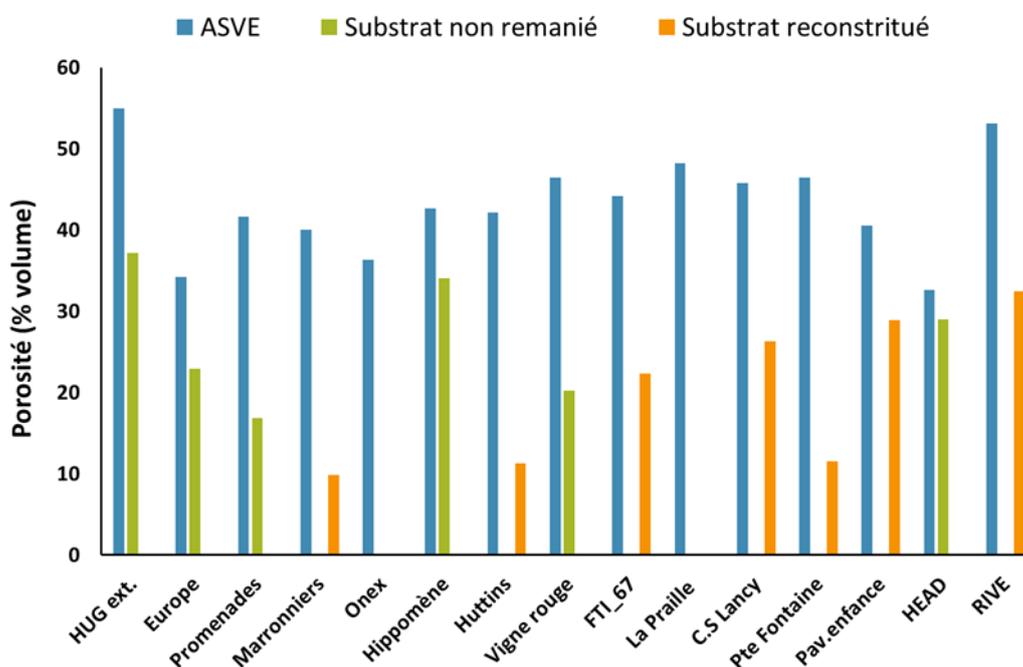


Figure 6. Porosité des substrats de toitures extensives selon le protocole ASVE et les courbes de désorptions réalisées sur des échantillons de substrats non remaniés (vert) ainsi que reconstitués (orange : terre fine + grossiers)

Rétention du substrat complet

Les capacités de rétention en eau de substrats de toitures extensives ont été mesurées au travers du protocole proposé par l'ASVE. Les résultats sont présentés en Erreur ! Source du renvoi introuvable..

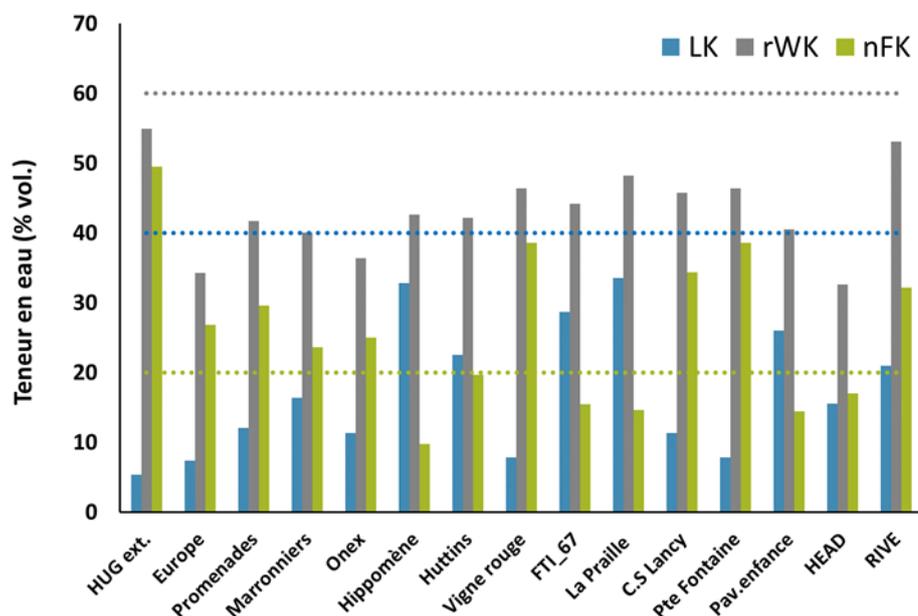


Figure 7. Rétention en eau du substrat de toitures extensives selon la méthode proposée par l'ASVE (% volumique). En bleu clair, la macroporosité (LK), en gris, le volume d'eau disponible pour les végétaux (rWK) et en vert, la capacité utile de rétention en eau (nFK). Les lignes pointillées de même couleur indiquent les exigences imposées par l'ASVE

Les exigences en matière de nFK doivent être ≥ 20 % (vol.). Dans notre cas, 9 toitures sur 15 répondent à ces exigences avec une moyenne totale de nFK de 30 %. Le maximum est mesuré à 49.6% sur la toiture des HUG (fort taux de terre fine). Les toitures ne rentrant pas dans les normes nFK sont: FTI_67 et la Praille (toitures de > 10 ans) ainsi que l'espace Hippomène, le Pavillon de l'Enfance et la toiture de la HEAD. Ces dernières sont pourtant récentes (moins de 10 ans).

En ce qui concerne les exigences de macroporosité (LK), aucun des substrats de toitures ne rentre dans les normes imposées à 40 % (vol.). La moyenne se trouve bien en dessous des exigences avec 17.3 % de LK. Les maxima et minima sont respectivement mesurés sur la toiture de la Praille avec 33.5 % et sur celle des HUG avec 5.4 %. Ces résultats sont étonnants étant donné le fort pourcentage d'éléments grossiers mesuré au travers des analyses granulométriques induisant normalement une forte macroporosité, particulièrement après remaniement.

Enfin, le seuil de 60 % d'eau disponible pour les plantes (rWK) n'est non plus pas atteint sur aucune toiture (Erreur ! Source du renvoi introuvable.). Rappelons que la rWK se calcule par l'addition de la nFK et de la LK, raison pour laquelle ces valeurs sont supérieures à la capacité utile de rétention en eau.

Deux répétitions des mesures ont été faites pour 7 des 15 substrats. Les variations entre les mesures ne dépassent pas les 5 % en moyenne hormis pour la toiture de l'école des Petites Fontaines où les différences entre les deux mesures sont très élevées, allant jusqu'à 80 %. Ce substrat présentait un fort engorgement durant l'expérience (comme sur la toiture), l'eau drainait très mal. Ceci est étonnant car le substrat n'a pas un pourcentage de terre fine (13 %) ou de matière organique (3.3 %) très important, pouvant parfois être la cause d'un mauvais drainage.

Les courbes de désorption sur substrat non remanié permettent elles aussi une mesure de rétention en eau du substrat complet, mais basées sur des mesures continues de potentiel matriciel (suction) et non un temps de ressuyage arbitraire. Le Tableau 2 compare ces mesures de rétention à celles mesurées via le protocole ASVE (%

vol.). Les résultats divergent de 20 à 70 % entre les deux méthodes et aucune tendance n'est à relever. Les valeurs ASVE surestiment autant qu'elles sous estiment les valeurs en comparaison avec la désorption. Les valeurs maximales de teneur en eau sont trouvées sur la même toiture pour les deux méthodes, à savoir les HUG (très forte teneur en terre fine) et les teneurs en eau de la toiture de l'EMS de la Rive sont équivalentes. La plus grosse différence de mesure est faite sur l'espace Cube Hippomène avec une valeur ASVE de plus de 3x inférieure à celle mesurée par désorption.

De nombreuses différences sont à relever entre le protocole ASVE et la mesure de désorption sur substrat non remanié. Les mesures ASVE sont faites à partir de substrat remanié ce qui n'est pas le cas des courbes de désorption. Le remaniement du substrat peut entraîner des modifications quant à l'organisation des particules entre elles, détruire des agrégats et changer la porosité totale du substrat donc sa rétention en eau. Les deux méthodes divergent aussi par le protocole de saturation de l'échantillon. Dans le cas ASVE, le substrat est saturé par immersion durant 15 minutes, dans l'autre, la saturation se fait plus progressivement, durant plusieurs jours, par capillarité sur un bac à succion, mais pas jusqu'à un potentiel nul (immersion). Le niveau de saturation n'est donc pas le même ce qui peut expliquer la moyenne ASVE légèrement supérieure. Cependant la saturation lente permet de remplir les pores fins en dissolvant l'air des parties non ouvertes. A l'inverse, l'immersion permet de remplir les pores les plus grossiers (ASVE), mais ces derniers sont censés drainer très rapidement ensuite. Le protocole ASVE est conçu pour être effectué sur des substrats neufs (gros volumes et échantillon remaniés).

Tableau 2. Capacité utile de rétention en eau des substrats selon (ASVE v/v) et teneur en eau des substrats non remanié à un potentiel de -10mbars (désorption v/v). En rouge, les données des courbes reconstituées.

Toitures	ASVE (v/v)	Désorption (v/v)
HUG ext.	0.50	0.37
Promenades	0.30	0.17
Marronniers	0.24	0.10
Hippomène	0.10	0.34
MQ Huttins	0.20	0.11
Vigne Rouge	0.39	0.20
FTI_67	0.16	0.22
C.S Lancy	0.34	0.26
Pte Fontaine	0.39	0.12
Pav. Enfance	0.15	0.28
HEAD	0.17	0.29
Rive	0.32	0.32
Moyenne	0.27	0.23
Ecart type	0.12	0.09

La corrélation entre les rétentions en eau selon ASVE et celles selon notre mesure de laboratoire sur substrat non remanié est nulle. Les valeurs ASVE, bien que mesurées sur un volume beaucoup plus grand, sont plus variables (plus grand écart type).

Rétention des éléments grossiers

La rétention en eau des éléments grossiers (% vol.) selon le protocole ADIVET (Figure 3) est en moyenne de 30 % (v/v), tout type de substrats confondus. Ce protocole permet de mettre en évidence la capacité de rétention en eau non négligeable des éléments grossiers. La moyenne de rétention des éléments de type tuile est de 35 %, et de 29 % pour la pouzzolane. Selon ces premiers résultats, les tuiles retiennent en moyenne plus d'eau que la pouzzolane. Quatre substrats ont une des valeurs de rétentions inférieures à 25% : l'espace Cube Hippomène, Vigne-Rouge, MQ Huttins et l'école des Petites Fontaines. Les mesures ont été répétées deux fois pour 6 des 15 toitures étudiées ici. Les écarts-types sont présents sur le graphique en Figure 3.

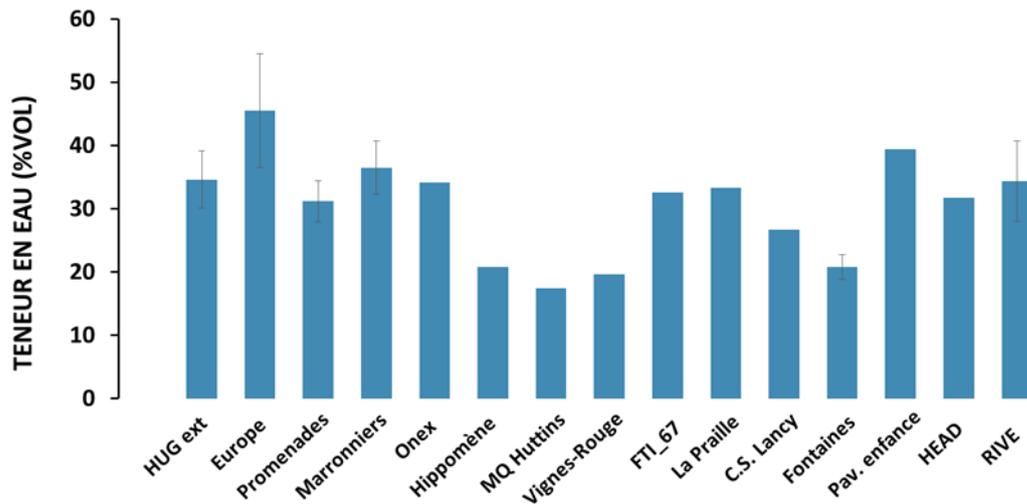


Figure 3. Rétention en eau des éléments grossiers en pourcentage volumique des toitures sur toitures extensives, mesure selon protocole ADIVET.

La mesure de la rétention en eau des éléments grossiers a également été faite grâce aux courbes de désorption (Erreur ! Source du renvoi introuvable.). Les mesures ont été répétées trois fois sur chacun des matériaux (mais pas sur le même échantillon). Ces courbes ont été obtenues en soustrayant la courbe de désorption des microbilles seules à celle des microbilles + éléments grossiers. La reproductibilité des mesures est bonne sur les tuiles. C'est moins le cas pour les mesures sur la pouzzolane. La variabilité de mesure provient certainement de la plus grande hétérogénéité du substrat de manière générale (il n'est jamais composé uniquement de pouzzolane contrairement au substrat tuile). La courbe de désorption des éléments grossiers utilisée dans ce travail est la courbe représentée en pointillé noir.

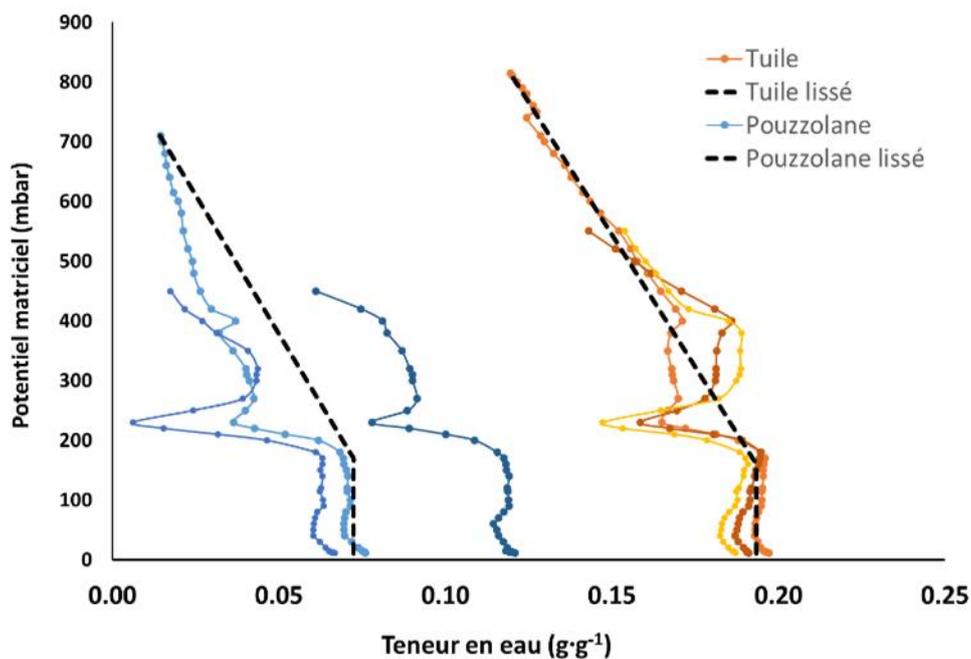


Figure 9. Courbes de désorptions sur éléments grossiers

Trois observations intéressantes ressortent de ces mesures. Premièrement les tuiles retiennent un pourcentage d'eau plus élevé que la pouzzolane, plus de trois fois plus à saturation. Deuxièmement, cette eau est relâchée régulièrement sur la gamme de potentiel mesurée (0-700 mbar), ce qui signifie que des pores fins (150 à 2 micromètres de rayon) sont en jeu. Troisièmement, la tuile dispose encore de 13% d'eau (m/m) à -700 mbar. Cette quantité est encore très élevée. Une toiture comportant 70% de tuiles concassées (en masse) disposera encore de $7 \cdot 0.13 = 9\%$ d'eau disponible pour les plantes à ce potentiel.

Les densités apparentes (masse sèche sur volume) des éléments grossiers ont été mesurées et sont de 2.40 et 2.19 respectivement pour la tuile et la pouzzolane. Ces valeurs nous permettent une conversion en pourcentage du volume des teneurs en eau en pourcentage de la masse. Suite à ce calcul les mesures ADIVET peuvent être comparées aux mesures de laboratoire.

Selon le protocole ADIVET, le pourcentage de rétention en eau de la tuile est de 35 % (v/v) comparé à 45 % (v/v) en mesure directe. La différence est d'autant plus grande pour la pouzzolane où la teneur en eau est mesurée à 29% (v/v) pour ADIVET versus 15 % (v/v). La valeur ADIVET paraît sur-estimée dans le cas de la pouzzolane et sous-estimée dans le cas de la tuile par rapport à la mesure directe. Une telle différence entre les deux méthodes est étonnante, sachant que les conditions de saturation sont les mêmes, à savoir 24h en immersion. La mesure de rétention ADIVET est faite après 2 heures de ressuyage. La différence entre les deux méthodes peut provenir de l'eau de surface contenue sur les éléments grossiers. Dans un cas, elle serait comptée comme de l'eau contenue dans les microbilles, dans l'autre comme de l'eau utile.

Rétention en eau de la terre fine

En **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** sont présentées les courbes de désorption mesurées sur la terre fine des toitures extensives. Toutes sont dans des gammes similaires. On décèle néanmoins une différence entre les courbes réalisées sur les substrats à base de tuiles (orange/jaune) et celles à base de pouzzolane (bleu). Les courbes sur substrat tuile retiennent plus d'eau que les autres, en moyenne $0.81 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ pour la tuile et $0.54 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ pour la pouzzolane (à un potentiel de -10 mbars). On peut supposer que les particules de tuile inférieures à 2 mm intégrées à la terre fine augmentent la rétention en eau de la terre fine.

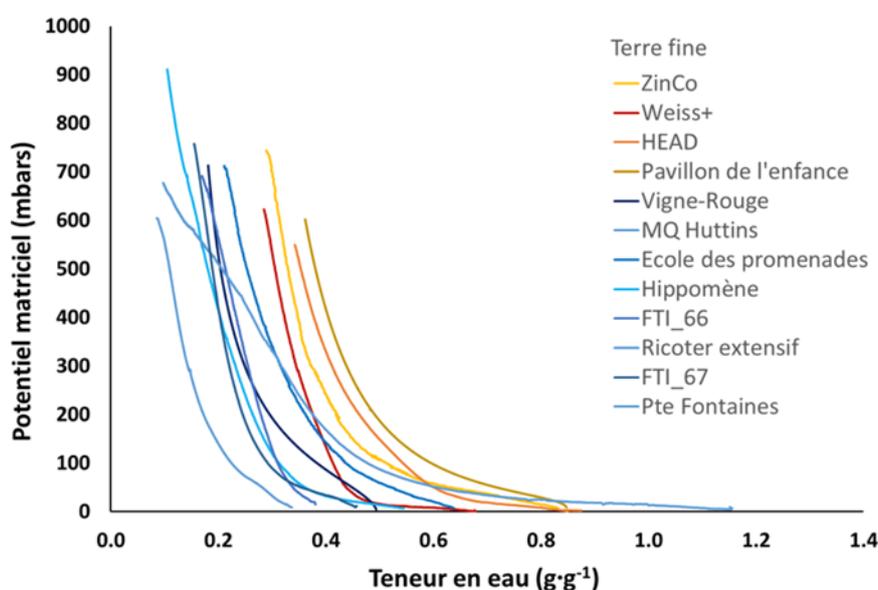


Figure 10. Courbes de désorption de la terre fine des toitures extensives

La composition en éléments grossiers d'un substrat de toiture n'est donc pas sans effet sur la rétention en eau de la terre fine. La terre fine des substrats à base de tuile retient presque deux fois plus d'eau à potentiel égal que celle des substrats pouzzolane, respectivement $0.81 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ et $0.54 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$.

Disposant des courbes de désorption de terre fine et des éléments grossiers, il devient intéressant de reconstituer les courbes de désorption de substrat complet à partir de l'addition des courbes de terre fine et celles des éléments grossiers en tenant compte de leurs proportions respectives (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En **Erreur ! Source du renvoi introuvable.A**, la reconstitution est globalement satisfaisante pour les substrats à base de pouzzolane. Les courbes reconstituées de l'espace Hippomène, de l'école des Promenades et de l'école de la Vigne-Rouge sont similaires à celles réalisées sur le substrat complet. Celles du substrat Ricoter (neuf) sont plus éloignées. Il s'agit ici d'un substrat riche en matière organique grossière (13.3%) qui n'a pas été prise en compte ni dans les mesures de terre fine (matériaux >2 mm) ni celle des grossiers (car pas de la pouzzolane). Cette MO retient de l'eau, ce qui peut expliquer que l'addition de la terre fine et des grossiers (minéraux) ne rende pas compte du substrat complet.

Concernant la reconstitution des substrats à base de tuile (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.B**), les résultats sont également concluants. On note néanmoins ici plus clairement une tendance à la surestimation des teneurs en eau par les courbes reconstituées comparativement aux mêmes substrats non remaniés. Les courbes sur substrat neuf (ZinCo) sont très proches. Ce substrat contient peu d'éléments organiques grossiers en comparaison de Ricoter.

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, compare les substrats neufs à leurs homologues plus anciens. On observe que les substrats de toitures « anciennes » ont tendance à retenir moins d'eau qu'un substrat neuf. Ceci peut être dû à une évolution du substrat en teneur de matière organique. La matière organique fraîche des substrats neufs est susceptible de retenir plus d'eau.

Ces comparaisons sont effectuées sur des petits volumes. Elles pourraient facilement être réalisées sur des volumes plus importants, ce qui diminuerait l'effet des éléments les plus grossiers sur les équilibres pondéraux et pourrait améliorer la prévision de la rétention du substrat non remanié par celle de ses éléments. Néanmoins, les résultats de la méthode testée sont très prometteurs. Les écarts entre les courbes reconstituées et sur substrat non remanié sont nettement plus faibles que ceux enregistrés entre les protocoles précis (mesure en continu) et les différents protocoles ASVE et ADIVET.

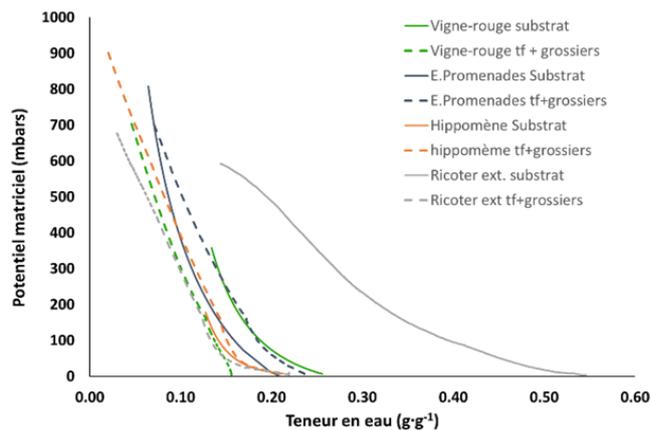


Figure 11. Comparaison entre courbes de désorption sur substrat non remanié et reconstitution à partir des courbes terre fine + grossiers sur toitures extensives. A : substrat pouzzolane ; B : substrat tuile.

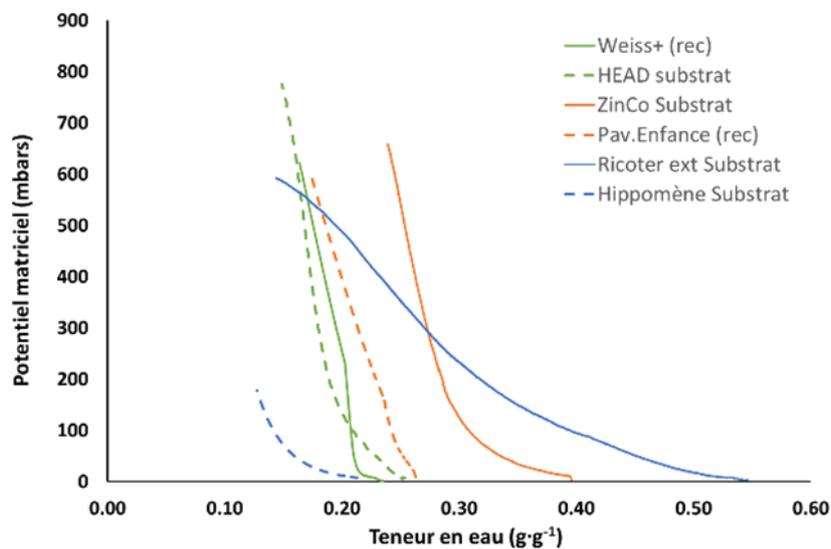
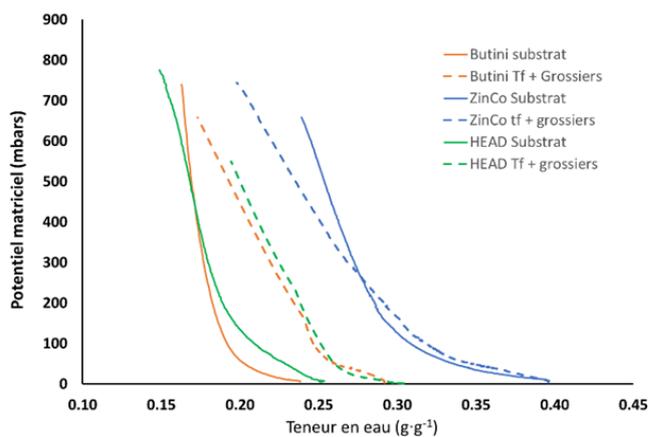


Figure 12. Comparaison entre substrat neuf et substrat de toiture homologue plus ancien

Ce chapitre nous permet d'avoir une vision d'ensemble sur les substrats de toitures extensives étudiées ici. Nous relevons de fortes divergences de résultats entre les différents protocoles : ASVE, ADIVET et désorption. Les mesures de rétention en eau des éléments grossiers s'accordent néanmoins sur une plus grande rétention des éléments tuile. Les méthodes proposées par l'ASVE et ADIVET ne semblent pas prendre en considération tous les éléments nécessaires et les résultats obtenus, affectés de forte variabilité, nous semblent douteux. La reconstitution de la rétention en eau d'un substrat par l'addition de la rétention de la terre fine et des éléments grossiers est une piste intéressante en raison de sa simplicité. Enfin, il est important de relever que les substrats neufs retiennent beaucoup plus d'eau que les substrats évolués.

3.1.3 BILAN HYDROLOGIQUE

Débits

Les mesures de débit débutent à différentes périodes pour toutes les toitures. Pour des raisons pratiques, la période de mesure analysée ici se déroule du 16.04 au 30.09 2015 pour 4 des 5 cinq toitures étudiées. Les mesures sur la toiture des HUG se terminent plus tôt, le 12.09.15. Les fortes précipitations du 13.09 ont ennoyé le système de mesure mis en place, ne permettant pas de prendre en compte les données. Durant la période de mesure (16.04 au 30.09 2015), il est tombé en moyenne 430 mm de pluie. Plus exactement, 407.74 mm pour l'EMS de la Rive, 417.2 mm pour les toitures de la HEAD, de l'Europe et des HUG et 463.8 mm pour l'EMS des Marronniers. Les conditions météorologiques de l'année 2015 furent particulières avec une fin de printemps enregistrant des intensités de précipitations record en suisse et un été caniculaire. L'excédent thermique s'est élevé à 2.4 °C par rapport aux normes. A Genève, du 1 au 7 juillet, la valeur moyenne de température mesurée fut de 36.7 °C. L'année 2015 se démarque par un manque de précipitations. Le mois de septembre a connu cependant des précipitations excédentaires (météo suisse, bulletin climatique 2015).

Les mesures de débits cumulées au cours du temps sont disponibles en Annexe III pour chacune des 5 toitures étudiées.

Il est intéressant de s'arrêter un instant sur les pourcentages moyens d'abattelements des eaux météoriques par les toitures (Tableau 3). Ce pourcentage est calculé au 12.09.15 afin d'avoir une comparaison entre toutes les toitures. Il est calculé comme le pourcentage d'eau qui est reçu sous forme de pluie mais qui ne s'écoule pas dans le réseau. Bien entendu, ce pourcentage moyen se construit aussi sur des événements dont certains peuvent peser lourd dans le bilan (Erreur ! Source du renvoi introuvable., ci-après).

Tableau 3. Précipitations et débits totaux ainsi que le pourcentage d'abattement sur chacune des 5 toitures étudiées sur la période du 16.04 au 12.09 2015.

Toitures	Cumul précipitations (m ³)	Débits totaux (m ³)	% d'abattement
HEAD	176	41	76.9
EMS RIVE	623	259	58.5
Europe	159	43.7	72.5
HUG	331	146	55.8
EMS Marronniers	36	13	64.6

Selon ces cumuls, la toiture la plus efficace en termes de rétention est la toiture de la HEAD avec 76.9% d'abattement des précipitations. Notons la différence bien marquée avec la toiture de l'EMS de la Rive car toutes deux ont le même type de substrat : matériaux grossiers unique en tuiles et faible pourcentage de terre fine dans les deux cas avec 13.7 % (m/m) pour la HEAD et 9.5 % (m/m) pour l'EMS de la Rive. Néanmoins, leur pourcentage d'abattement diffère de plus de 20 %. Cette différence peut trouver une explication quant à la différence de profondeur du substrat. En effet, la toiture de la HEAD s'aménage en un milieu irrégulier avec une profondeur variant de 6 à 12 cm. La toiture de l'EMS de la Rive est, elle, beaucoup plus régulière avec une moyenne de 6 cm. Il est néanmoins surprenant que la toiture de l'EMS de la Rive, retienne un pourcentage d'abattement inférieur à celui de l'EMS des Marronniers. Ce dernier étant composé de 91 % (m/m) d'éléments grossiers (majoritairement de la pouzzolane cette fois) soit 9 % (m/m) de terre fine et d'une épaisseur de substrat moindre (3.5 cm en moyenne). Il est possible que cette différence de comportement soit due aux sous couches, informations non disponible faute de pouvoir démonter la toiture.

Les toitures de l'école de l'Europe et des HUG ont un pourcentage d'abattement bien différent elles aussi, avec respectivement 72.5 et de 55.8 %. Ces deux toitures sont pourtant assez semblables visuellement et en termes de type de substrat avec néanmoins une forte différence de pourcentage de terre fine soit 36.6 % (m/m) et 71.3 % (m/m) et pour respectivement la toiture de l'Europe et celle des HUG. Cet écart de 25 % est donc

intrigant. De nouveau, on voit que la toiture présentant le plus d'éléments grossiers assure le plus fort taux d'abattement. Notons aussi que les deux toitures ont une couche de drainage (billes d'argiles). La forte différence entre les deux toitures peut également s'expliquer par une variation de profondeur du substrat, avec 14 cm en moyenne sur la toiture de l'Europe et 10 cm sur celle des HUG.

Les normes FLL estiment pour les toitures extensives un abattement annuel de 40 à 60 %. Les 5 toitures extensives étudiées ici entrent dans cette norme.

Comme la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** nous le montre, les écarts de pourcentage moyen d'abattement entre les toitures se révèlent lors de quelques événements précis (entourés en rouge). Les fortes précipitations du mois de mai (25.04 au 07.05) engendrent des réponses très similaires sur toutes les toitures avec de forts débits hormis sur la toiture de la HEAD qui se distingue par une plus grande capacité de rétention.

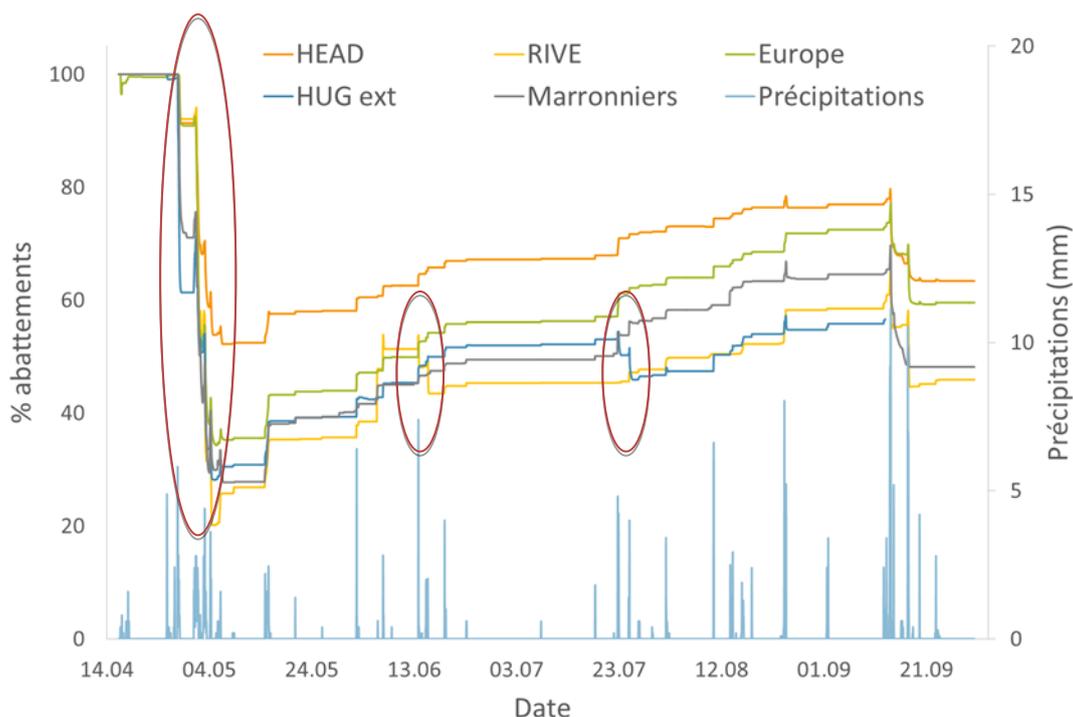


Figure 13. Pourcentage d'abattement moyen des débits sur 5 toitures extensives du 14.04 au 30.09.15. Encerclé de rouge, les précipitations ayant un effet sur le pourcentage d'abattement annuel.

Ce sont les précipitations du 13 au 15.06.15 qui font chuter le pourcentage d'abattement de l'EMS de la Rive avec un taux d'abattement passant de 50 à 40 %. On enregistre à cette période des intensités pluviales plus fortes sur la toiture de l'EMS de la Rive (25.2 mm/h versus 6 mm/h pour les autres toitures). Puis ensuite les précipitations du 22 au 25.07.15 ont le même effet sur la toiture des HUG (ext.). Les intensités pluviales ne sont pas disponibles pour cette toiture.

Il semble donc que les différences de taux d'abattement entre les toitures soient dues à des accidents ponctuels. En occultant les trois événements exceptionnels nous pouvons voir que les 5 toitures étudiées ici réagissent de manière très similaire, avec un taux d'abattement moyen de l'ordre de 70% hors événement exceptionnel.

Temps de retard et écrêtage

Le temps de retard des 5 toitures étudiées est évalué en moyenne entre 3 et 5 heures. Les maximums sont mesurés 12h après le début d'une pluie. La moyenne des temps de retards observés sont équivalent d'une toiture à l'autre. Ceux-ci dépendent bien sûr de l'état de saturation du substrat et de l'intensité pluviale. La

Erreur ! Source du renvoi introuvable. montre le temps de retard des débits mesuré sur la toiture de l'EMS des Marronniers

Dans le cas de la toiture des Marronniers ci-dessus (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), les débits de pointe sont écrêtés de 50 à 80 %. Ce cas est parfaitement représentatif des valeurs moyennes d'écrêtage des débits de pointe mesuré sur les 4 autres toitures extensives. Les maximas et minimas enregistrés sur les 5 toitures se situent entre 30 et 90 %.

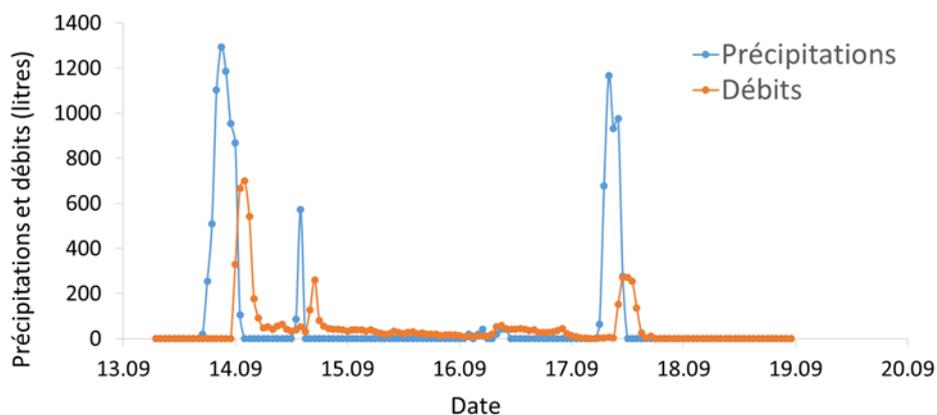


Figure 14. Illustration du temps de retard mesuré sur la toiture de l'EMS des Marronniers.

Les temps de retards mesurés dans cette étude paraissent particulièrement longs par rapport aux valeurs renseignées dans la littérature. Dans leur revue sur les performances hydrologiques de toiture, Li et al. (2014), trouvent en moyenne des temps de retards mesurés entre 0 et 30 minutes. Rappelons néanmoins que la majeure partie des études sur toitures végétalisées se font sur des prototypes de petite dimension, conçus pour l'expérience, reproduisant rarement les conditions trouvées sur le terrain. De plus, les pentes des toitures étudiées ici (pour celles dont l'information était disponible) sont particulièrement faibles, situées entre 0 et 1.5%, ne favorisant pas un drainage rapide.

L'écrêtage des débits de pointe constaté sur les toitures extensives se situe dans la gamme des valeurs proposées par la littérature à savoir entre 22 et 93 % avec une moyenne de 65% environ. (Li et al., 2014).

3.1.4 EVAPOTRANSPIRATION RÉELLE ET POTENTIELLE

L'ETR a été déduite à partir des données de teneur en eau du substrat au cours du temps, durant des périodes sans débit ni précipitation avec un potentiel inférieur à 1 bar (donc bonne disponibilité de l'eau). Ceci nous permet d'avoir pour quelques périodes une évaluation de l'ETR pour chacune des 5 toitures extensives étudiées. Malheureusement seules deux périodes de mesure d'ETR sont identiques sur toutes les toitures nous permettant ainsi une comparaison (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Notons néanmoins, que le potentiel matriciel (inscrit au-dessus des colonnes) n'est pas le même et n'évolue pas de la même manière sur chacune des toitures compliquant de ce faite une réelle comparaison de l'ETR. Les valeurs d'ETR ont pu être comparées à celles d'ETP calculées à l'aide la formule de Penman-Monteith selon la FAO (soit pour une surface de référence (herbe) bien arrosée) en utilisant les données de Météo Suisse ou bien, sur les données fournies par la station météo sur le toit de la HEAD.

L'ETP calculée à partir des paramètres mesurés sur la toiture de la HEAD par l'équipe thermique se trouve plus de deux fois supérieure à celles données par Météo Suisse (station Cointrin, évaporation de référence FAO). Il aurait été judicieux de comprendre la raison de cette divergence et de mettre en lumière le/les paramètres induisant cet écart. Néanmoins, il est important de relevé ici que la station météo sur la toiture de la HEAD se trouvait en bordure de toit, et pas à 2 m du sol comme le préconise la FAO. Pour ces raisons, ce sont les données de Météo Suisse qui ont été utilisées pour les comparaisons ETP/ETR en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

La Erreur ! Source du renvoi introuvable. montre l'ETR des 5 toitures suivies sur deux périodes du 25.05 au 29.05 et du 19.06 au 23.06 2015. Les chiffres au-dessus de chaque colonne sont les moyennes journalières de potentiel matriciel en cbars. Durant ces périodes le potentiel matriciel varie entre 5 et 130 cbars.

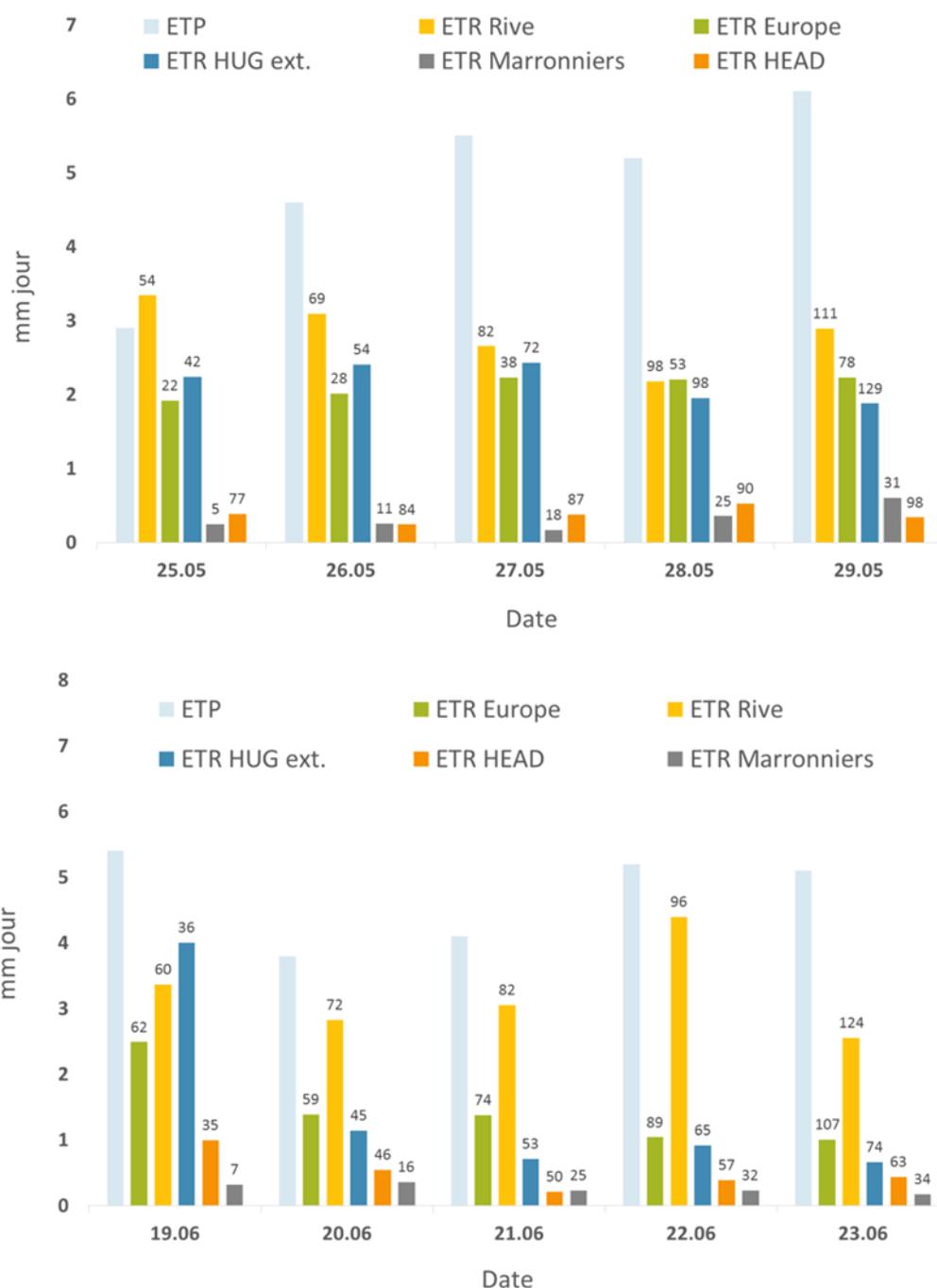


Figure 15. Comparaison sur une même période des évapotranspirations réelles (ETR), mesurées sur 5 toitures extensives et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) (FAO, Météo Suisse). Les chiffres au-dessus du taux d'ETR correspondent à la moyenne du potentiel matriciel de la journée en cbar.

On note une ETR globalement bien plus réduite que l'ETP avec une moyenne de 1.48 mm jour⁻¹ versus 4.79 mm jour⁻¹ pour l'ETP menant à une différence de 70 % sur les deux périodes comparées. Ces résultats ne sont pas étonnants, rappelons l'ETP ne tient pas compte de la teneur en eau du sol (considérée comme abondante) et est calculée pour une surface de référence (herbe, gazon), ce qui n'est pas le cas des toitures végétalisées.

De manière plus générale, les moyennes d'ETR mesurées sur la saison de végétation (mars-septembre) sur chacune des toitures sur un potentiel matriciel variant de 15 à 100 Cbars est dans l'ordre croissant de: 0.45 mm pour l'EMS des Marronniers, 0.94 mm pour la HEAD, 1.94 mm pour la toiture des HUG, 2.36 mm pour l'école de l'Europe et 3.21 mm pour l'EMS de la Rive. Les deux premières toitures, à savoir celle des Marronniers et de la HEAD sont constituées principalement de mousses et de sedums connus pour leur tolérance à la sécheresse (VanWoert et al., 2005). Il n'est donc pas étonnant que ces deux toitures figurent en bas de la liste. Les valeurs d'ETR paraissent néanmoins faibles par rapport à la littérature située entre 1 et 3 mm (Marasco et al., 2015). Les toitures des HUG et de l'école de l'Europe sont des toitures avec une épaisseur de substrat ainsi qu'une végétation de type herbacée plus importante. La toiture de Rive est en tête de liste avec une végétation abondante de type graminée (*festuca* sp.).

Il est intéressant de remarquer l'influence du type de substrat dans les mesures d'ETR. L'EMS de la Rive, au substrat tuile, est la toiture sur laquelle le plus haut taux d'ETR est mesuré. Ceci n'est pas le cas de la toiture de la HEAD (substrat tuile également) qui révèle des taux d'ETR très bas. Ceci serait dû à sa végétation principalement constituée de sedums. De plus, au milieu de l'été, l'entretien a enlevé plus de la moitié de la végétation, laissant la toiture quasiment nue. Les autres toitures, au substrat de type pouzzolane pour l'EMS des Marronniers et mélange pouzzolane/ argile pour les HUG et l'Europe ont un taux d'ETR globalement plus faible.

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**A montre le cumul de l'ETR des 5 toitures extensives sur une même période avec leur réserve en eau correspondante (mesure ASVE). Il est ici intéressant de voir que la réserve en eau mesurée ne correspond pas à celle utilisée par les plantes qui se reflète en ETR. Elle est en majeure partie surestimée, de 93, 68 et 35 % respectivement pour la HEAD, l'EMS des Marronniers et la toiture des HUG, mais se trouve sous-estimée sur la toiture de l'Europe (16 %) et de l'EMS de la Rive (38 %).

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**B représente également le cumul de l'ETR avec cette fois les valeurs de réserve en eau mesurées par désorption. Les résultats sont plus proches avec néanmoins des valeurs globalement sous estimées (entre 7 et 45 %). La toiture de l'EMS de la Rive est, elle, très fortement en dessous avec plus de 95 % de différence mesurée entre la réserve en eau utilisée par les plantes (ETR) et celle mesurée via la désorption. La valeur utilisée pour la toiture de l'Europe est celle mesurée selon le protocole ASVE car les mesures de désorption sur le substrat complet non remanié n'ont pu être possibles.

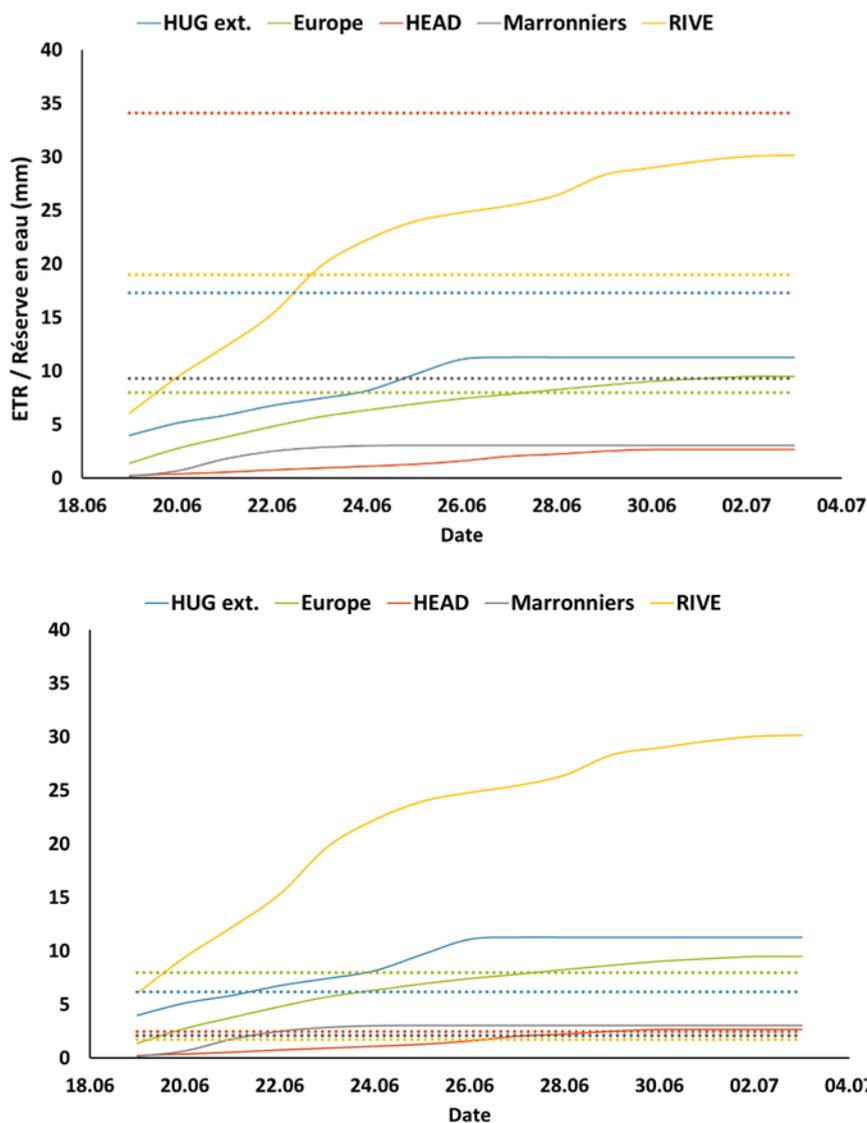


Figure 16. Cumul de l'ETR sur la période du 19.06 au 03.07.2015. En traitillé de la même couleur la réserve utile de chacune de toiture (en mm). A : mesure de réserve en eau selon mesure ASVE, B : selon désorptions.

Ce chapitre nous donne un aperçu du comportement des toitures extensives. Certains résultats sont étonnants et demandent approfondissement. En effet, nous avons pu voir par exemple que la rétention en eau mesurée sur le substrat des HUG (cf Tableau 2) se trouve être la plus élevée. Cependant, nous observons que cette même toiture fait partie de celles avec le plus faible pourcentage d'abattement (cf Tableau 3). La toiture de l'EMS de la Rive a le plus haut taux d'ETR. Cependant, sa capacité de rétention est l'une des plus faibles, avec un pourcentage d'abattement à 58.5 %. A l'inverse, la HEAD et de l'EMS des Marronniers, ont une très faible évapotranspiration mais un grand potentiel de rétention en eau, respectivement 76.9 et 64.6 %.

Il est ainsi difficile aujourd'hui d'évaluer le rôle de l'épaisseur des substrats, de leur teneur en terre fine et matière organique sur l'ETR et la rétention en eau. Nous avons pu mettre en lumière plusieurs pistes néanmoins. Le type d'éléments grossiers paraît effectivement un élément important qui ressort fortement dans cette étude. La tuile semble avoir un rôle important dans la rétention en eau.

La profondeur du substrat semble aussi être un élément important. Ce dernier augmente la réserve en eau potentielle et réduit les périodes de stress hydriques (Young et al., 2014). Néanmoins, une plus grande profondeur de substrat induit une augmentation de terre fine, de MO, etc. Il serait donc intéressant de comprendre lesquels de ces paramètres ont une influence sur la rétention en eau.

La comparaison entre les différents protocoles nécessite plus de répliques car les valeurs divergent énormément. Les protocoles ASVE et ADIVET ne paraissent pas totalement adaptés à la mesure de rétention en eau de substrat de toitures.

3.2 DIAGNOSTIC D'ÉVOLUTION DES SUBSTRATS

Le diagnostic de l'évolution des substrats est une partie délicate. La comparaison temporelle entre substrats n'est pas évidente étant donné le peu d'information que nous avons pu obtenir sur l'historique des toitures. Seul 3 substrats peuvent être comparés entre eux : Weiss+ et la toiture de la HEAD (2010) ; ZinCo et le pavillon de l'enfance (2011) ainsi que Ricoter et l'espace Cube Hippomène (2008). Ces trois toitures sont relativement récentes. Entre substrat neuf et substrat de toiture, on observe visuellement une disparition des éléments organiques frais après quelques années avec une augmentation des particules fines (La profondeur du substrat semble aussi être un élément important. Ce dernier augmente la réserve en eau potentielle et réduit les périodes de stress hydriques (Young et al., 2014). Néanmoins, une plus grande profondeur de substrat induit une augmentation de terre fine, de MO, etc. Il serait donc intéressant de comprendre lesquels de ces paramètres ont une influence sur la rétention en eau.). Ceci s'observe également par une nette augmentation (plus de 30 %) de la terre fine sur les toitures de la HEAD et de l'espace Hippomène par exemple. La comparaison des courbes de désorption entre substrat neuf et substrat de toiture appuie cette conclusion.

Rappelons également que la comparaison des substrats neufs à leur homologue plus ancien a permis de mettre en évidence une tendance des substrats plus anciens à retenir moins d'eau qu'un substrat neuf. La MO, plus importante dans les substrats neufs, permet une plus grande rétention en eau.

L'observation à la loupe binoculaire montre également des revêtements organiques et des micro-agrégats sur les éléments grossiers. Une étude en microscopie électronique et une caractérisation biochimique de la matière organique par spectroscopie serait des perspectives intéressantes pour comprendre les processus d'évolution en jeu.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude de toitures végétalisées préexistantes en ville de Genève a permis de mettre en lumière de nombreux aspects intéressants. L'étonnante rétention en eau des substrats à base de tuiles est l'un des résultats probants de cette étude. Il serait intéressant d'approfondir ces questions car d'une meilleure rétention en eau découle une végétation plus abondante, une ETR plus importante, etc., augmentant ainsi de manière générale les bénéfices associés aux toitures végétalisées.

Dans cette étude, les toitures extensives étudiées opèrent un abattement des pluies de 45 à 63 % sur la période de végétation (avril-septembre 2015) démontrant leur intérêt dans la gestion des eaux urbaines. L'écrêtage est important, et le temps de retard plus élevé sur ces toitures réelles que sur les toitures modèles utilisées dans la littérature. La comparaison des protocoles ASVE et ADIVET aux courbes de désorption met en évidence certains problèmes de méthodologie qu'il serait intéressant d'approfondir. Les temps de saturation ainsi que ceux de ressuyage peuvent être remis en question. Des répliques doivent être effectués. Néanmoins, selon nos résultats, les protocoles actuellement proposés par l'ASVE et ADIVET surestiment grandement les valeurs de rétention en eau des substrats. Le suivi hydrologique de toiture par sonde watermark® a permis, en période de sécheresse, d'estimer l'évapotranspiration réelle de toitures extensives. Cette méthode, assez simple, permet de manière assez efficace d'avoir un ordre de grandeur de l'ETR sur de courtes périodes. Il serait intéressant à présent d'explorer les relations ETR/ETP en discutant les paramètres de l'équation de Penman-Monteith (FAO Smith et Allen 1992).

Le diagnostic d'évolution des substrats mérite un plus grand approfondissement avec des comparaisons plus poussées entre substrats neufs et de toiture. Une visualisation de l'agrégation et de la matière organique au microscope électronique peut être intéressante et apporter des informations plus précises sur le sujet.

Cette étude a permis de visualiser les éléments importants du substrat dans la rétention en eau de toitures. Ces derniers, tel que la proportion de terre fine, la nature des éléments grossiers, la proportion de matière organique (une fois humifiée) et l'épaisseur du substrat pourraient être utilisés à la mise en place d'un indicateur de qualité (scoring). Ceci pour permettre d'évaluer le potentiel de rétention en eau d'une toiture à partir de la mesure de ces différents éléments.

RÉFÉRENCES

ADIVET, CSFE, SNPPA, UNEP. Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées (2007) Ed. n°2

Ampin P., Sloan J., Cabrera R., Harp D. & Jaber F. (2010) Green roof growing substrates: types, ingredients, composition and properties. *Environ. Horticult* 28 pp. 244–252

Antrop, M. (2004). Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landsc. Urban Plann.* 67, 9–26

ASVE. Directives pour la végétalisation extensive des toitures : Capacité hydrique et degré de recouvrement de la végétation (1999)

Baize D. (2000) Guide des analyses en pédologie INRA

Beretta, C., Poe, S., & Stovin, V. (2014). Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. *Journal of Hydrology* vol. 516, 37-49

FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau). (2008). Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green roofing. Bonn, Germany

Guerin I., Laperche V., Grangeon S. & Hubé D. (2014) Characterisation of mercury contaminated sites. Project No. SN-03/08

Getter K.L., Rowe D.B & Anderson J.A. (2007). Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering* 31 225-231

Graceson A., Hare M., Monaghan J. & Hall N. (2013). The water retention capabilities of growing medias for green roofs. *Ecological Engineering* 61 328-334

Hargreaves G. H. & Allen R. G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation, *J. Irrig. Drain. Eng* 129, 53–63

Li Y. and Babcock R.W. (2014). Green roof hydrologic performance and modeling : a review. *Water science and technology*, 69 (4) 727-738

Mentens J., Raes D. and Hermy M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* 77 217-226

Marasco D.E., Culligan P.J. & McGillis W.R. (2015). Evaluation of common evapotranspiration models based on measurements from two extensive green roofs in New York City. *Ecological Engineering* Vol. 84, 451-462

Massy J., Martin P. & Wyler N. (2011). Cartographie semi-automatisée des toitures végétalisées de la ville de Genève. *Géomatique Expert*, n81

Priestley, C.H.B., & R.J. Taylor. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100:81-82

Saadatian O., Sopian K., Salleh E., Lima C.H., Riffat S., Saadatian E., Toudeshki A. & Sulaiman M.Y. (2013). *Renewable and Sustainable Energy Review* 23 155-168

Smith M., Allen R., Monteith J.L, Perrier A., Santos Pereira L. & Segeren A. (1992) Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirement – FAO Irrigation and drainage paper 56

Speak A.F., Rothwell J.J, Lindley S.J and Smith C.L. (2013). Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. *Science of the total environment* 461-462 28-28

VanWoert N.D., Rowe D.B., Anderson J.A., Rugh C.L., and Xiao L. (2005). Watering Regime and Green Roof Substrate Design Sedum Plant Growth. *HortScience* 40(3) : 659-664

Young, T., Cameron D.D., Sorrill J., Edwards T., & Phoenix G.K. (2014). Importance of different components of green roof substrate on plant growth and physiological performance. *Urban Forestry and Urban Greening*, 13 :507-516

ANNEXES I : ANALYSES CHIMIQUES

Tableau 4. Résultats des analyses chimiques sur l'ensemble des toitures étudiées

	Analyses/ Toitures	Carbone organique %	Azote organique %	C/N	% M.O	pH	CEC (cmolc/kg)
Substrats neufs	Ricoter int.	8.9	0.50	18.9	14	7.2	23.1
	Ricoter ext.	7.5	0.30	25.8	13.3	7.2	20.3
	ZinCo	4.5	0.30	15.2	6.2	7.1	17.5
	Weiss +	5.8	0.20	34.1	8.8	7.6	16.8
Extensive <10 ans	MQ Huttins	0.8	0.01	63.8	0.7	7.7	2.0
	Promenades	2.7	0.17	15.9	3.8	7.0	12.0
	Vigne rouge	3.3	0.17	19.1	3.1	6.9	12.3
	Hippomène	2.3	0.15	15.1	2.6	7.9	7.7
	Marronniers	4.1	0.30	14.0	6.2	6.6	16.7
	Fontaines	2.6	0.10	20.3	3.3	6.6	11.3
	HEAD	6.0	0.50	11.0	9.5	7.9	25
	Pav.enf	4.6	0.37	12.3	6.3	7.2	19.0
	Rive	5.7	0.40	13.3	8.3	7.3	24.1
	Butini	7.4	0.73	10.1	8.7	7.5	29.4
Extensive >10 ans	Europe	2.6	0.20	13.5	3.3	7.1	13
	HUG	6.9	0.60	12.0	10.4	6.7	40.5
	C.S Lancy	2.3	0.08	27.7	1.8	6.8	3.8
	Piscine Onex	3.2	0.20	20.7	5.8	5.9	5.6
	La Praille	1.1	0.08	14.2	1.5	7.2	4.1
	FTI 66	2.4	0.18	13.6	3.4	7.3	8.1
	FTI 67	1.8	0.09	19.3	1.9	7.1	7.2
Intensives <10 ans	Club des ainés	6.3	0.51	12.3	9.1	7.1	32.6
	Pommiers 33	8.3	0.27	31.1	6.9	6.5	12.0
	Pommiers 33bis	4.8	0.17	28.2	6.3	6.7	13.9
	Seymaz-05	3.7	0.30	14.8	4.1	7.5	19.8
	HUG	2.9	0.20	18.2	2.7	6.2	9.2
Intensives >10 ans	Coop Augustins	3.0	0.24	12.8	3	7.3	14.6
	Zurich Assurance	4.9	0.36	13.7	5.6	7.5	24.5
	Garage Autobritt	5.5	0.43	12.9	6.1	7.4	24.7
	Horlogerie	5.1	0.38	13.4	6.6	7.2	27.0
	Petit Senn	7.4	0.50	14.7	12.7	7.5	38.5

	Analyses/ Toitures	Intensité (extrait H ₂ O)				Quantité (extrait AAEDTA)			
		P	k	Mg	Ca	P	k	Mg	Ca
Substrats neufs	Ricoter int.	14	339.7	82.3	769	255	636	395	16021
	Ricoter ext.	11.6	268.8	163.9	1165	176.4	755	424	7705
	ZinCo	11.3	190.7	126.5	654	133.7	622.0	721.0	22618.0
	Weiss +	4.9	124.8	82.2	1096	104.7	278	333	15152
Extensive <10 ans	MQ Huttins	1.3	36.6	3.1	59	97.4	195.0	46.0	1959.0
	Promenades	2.7	106.2	19.1	198	51.3	626.0	109.0	2673.0
	Vigne rouge	3.5	81.7	15.4	105	91.4	693.0	170.0	3150.0
	Hippomène	1.6	56.5	2.0	13	41.2	464.0	83.0	1778.0
	Marronniers								
	Fontaines	3.1	103.0	24.8	186	41.1	624.0	135.0	2092.0
	HEAD	5.2	75.2	19.0	377	337.0	390.0	754.0	51957.0
	Pav.enf	5.4	77.5	14.1	256	189.8	270.0	567.0	32021.0
	Rive	7.6	64	19.0	448	164.3	167	171	13877
	Butini	6.3	96.1	26.1	420	324.0	384	850.0	50568
	Extensive >10 ans	Europe	6.6	42	10.7	391	47.5	114	156
HUG		8.7	18.1	24.1	499	247	60	200	10110
C.S Lancy		1.4	45.1	3.3	22	37.9	552.0	60.0	1237.0
Piscine Onex		2	97.1	16.1	67	21	343	161	1656
La Praille		1.4	11.1	2.8	99	8.8	67.0	245.0	37995.0
FTI 66		2	80.2	9.3	178	53.8	450.0	59.0	2327.0
FTI 67		1.6	73.6	10.1	111	40.7	658.0	79.0	1785.0
Intensives <10 ans	Club des aînés	11.1	35.5	16.2	276	174.8	140.0	307.0	14569.0
	Pommiers 33	4.5	68.2	11.0	70	84.7	324.0	150.0	2010.0
	Pommiers 33bis	2.5	57.7	13.1	69	46.7	428.0	195.0	2326.0
	Seymaz-05	16	52.7	19.4	408	285	204	169	13475
	HUG	6.2	152.0	21.4	132	129.6	879.0	171.0	2080.0
Intensives >10 ans	Coop Augustins	20.5	11.8	10.0	400	32.2	44.0	79.0	8600.0
	Zurich Assurance	4.3	11.7	19.7	710	81.0	62.0	178.0	12674.0
	Garage Autobritt	19.1	36.7	26.4	822	142.0	112.0	154.0	9343.0
	Horlogerie	10.7	20.8	14.8	375	191.0	84.0	211.0	25517.0
	Petit Senn	9.7	71.7	35.7	854	115.9	155	267	24170

ANNEXE II : GRANULOMÉTRIE

Tableau 5. Granulométrie des toitures extensives, intensives et de substrats neufs

Fraction (mm)/toitures	Marronniers	E.promenade	Pte fontaine	MQ Huttins	Vigne-rouge	C.S Lancy
0.04	0.8	0.6	0.3	0.20	1.27	0.50
0.063	1.4	1.4	1.2	0.63	1.23	0.82
0.125	2.1	1.7	1.5	2.74	2.19	2.79
0.25	1.6	1.7	2.3	4.61	4.41	6.93
0.5	1.4	1.6	3.9	4.25	2.98	4.42
1	1.7	2	3.8	7.24	2.44	4.96
Total < 2mm (%)	9	9	13	19.67	14.51	20.41
2	3.1	3.8	5.9	26.69	6.99	9.83
4	37.2	23.1	17.6	23.93	7.14	19.46
6.3	50.7	64.1	63.5	29.70	71.36	50.29
Total > 2mm (%)	91	91	87	80.33	85.49	79.59
Fraction (mm)/toitures	Hippomène	FTI 66	FTI 67	Rictoter ext	HEAD	RIVE
0.04	1.62	0.24	0.13	0.09	1.05	1.60
0.063	1.70	0.48	0.31	0.32	1.42	1.80
0.125	2.46	1.34	1.84	1.24	2.40	1.60
0.25	5.44	4.55	7.01	3.78	4.35	1.50
0.5	3.90	7.64	6.71	2.85	1.89	1.30
1	5.00	6.75	8.87	3.03	2.61	1.70
Total < 2mm (%)	20.11	21.00	24.88	11.30	13.70	9.50
2	12.11	17.88	15.62	9.36	7.44	3.30
4	15.40	23.06	22.28	23.02	9.29	22.50
6.3	52.38	38.05	37.22	56.32	69.57	64.70
Total > 2mm (%)	79.89	79.00	75.12	88.70	86.30	90.50
Fraction (mm)/toitures	Butini	Pav enfance	Weiss+	Zinco	ONEX	HUG ext.
0.04	0.08	0.36	1.02	0.42	0.30	0.20
0.063	0.23	0.83	0.83	1.17	0.60	0.40
0.125	0.83	1.12	2.10	3.71	1.10	1.10
0.25	5.11	1.93	2.10	7.65	1.50	1.20
0.5	2.44	1.25	1.40	3.06	0.10	58.60
1	2.05	2.06	1.91	3.62	3.40	9.60
Total < 2mm (%)	10.74	7.55	9.35	19.63	7.00	71.10
2	5.24	7.28	4.63	6.69	5.00	7.90
4	9.65	16.85	13.02	11.93	25.30	12.30
6.3	74.38	68.32	73.00	61.75	62.70	8.70
Total > 2mm (%)	89.26	92.45	90.65	80.37	93.00	28.90

Fraction (mm)/toitures	Europe+	Europe-	Praille	Seymaz	Zurich	Autobritt
0.04	0.90	0.80	0.11	0.52	0.34	0.39
0.063	1.40	1.30	0.37	1.20	1.25	1.82
0.125	3.30	3.00	1.52	8.05	11.37	7.47
0.25	6.60	7.00	7.28	23.05	14.33	24.98
0.5	10.30	10.90	1.89	16.62	15.58	24.54
1	14.10	15.40	1.88	22.83	20.66	24.48
Total < 2mm (%)	36.60	38.40	13.06	72.26	63.54	83.68
2	16.00	16.00	18.80	14.02	20.26	13.44
4	35.90	32.80	54.04	9.28	10.83	2.28
6.3	11.50	12.80	14.11	4.45	5.37	0.60
Total > 2mm (%)	63.40	61.60	86.94	27.74	36.46	16.32
Fraction (mm)/toitures	Augustins	Pt Senn	Horlogerie	HUG int.	Pommier33	Pommier33bis
0.04	0.16	3.11	5.82	4.81	1.39	1.00
0.063	1.10	3.10	9.48	3.13	1.42	1.63
0.125	7.89	5.55	11.72	4.32	3.06	2.54
0.25	37.38	21.43	24.20	7.26	6.83	7.71
0.5	21.87	24.97	17.51	4.06	7.72	9.09
1	15.11	20.84	17.39	6.20	9.75	14.20
Total < 2mm (%)	83.51	79.00	86.11	29.78	30.16	36.15
2	3.51	9.02	7.47	26.98	14.85	23.23
4	2.86	6.30	4.28	29.63	20.57	17.61
6.3	10.11	5.69	2.14	13.61	34.42	23.01
Total > 2mm (%)	16.49	21.00	13.89	70.22	69.84	63.85
Fraction (mm)/toitures	Club des aînés	Ricoter int.				
0.04	1.19	2.02				
0.063	2.27	3.68				
0.125	11.35	6.27				
0.25	29.72	11.15				
0.5	26.21	8.82				
1	12.75	12.67				
Total < 2mm (%)	83.50	44.62				
2	8.55	15.41				
4	5.38	23.48				
6.3	2.57	16.49				
Total > 2mm (%)	16.50	55.38				

ANNEXE III : CUMUL DES DÉBITS

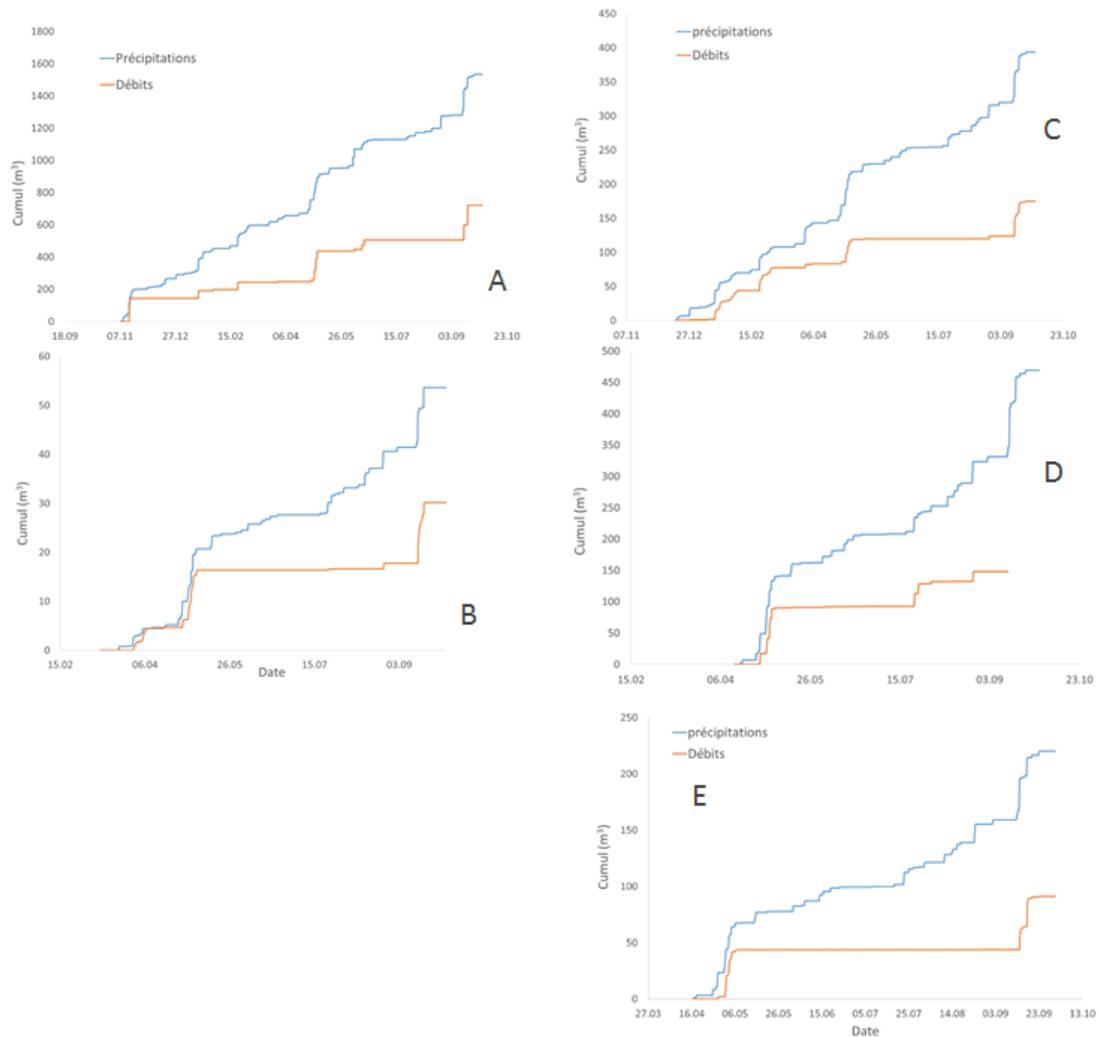


Figure 17. Cumul du débit total (Orange) et des précipitations (bleu) sur les 5 toitures extensives étudiées. A : Rive, B : EMS des Marronniers, C : HEAD, D : toiture des HUG, E : Ecole de l'Europe