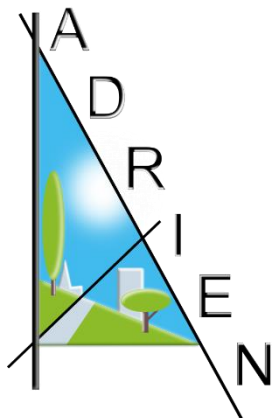


PROJET ADRIEN

ARBRES DISPERSES ET ROLE DANS LES INVASIONS D'ESPECES NUISIBLES

2012-2015



COMPTE – RENDU SCIENTIFIQUE



Un projet financé par la Région Centre Val de Loire

Région
Centre-Val de Loire

Partenaires :



Rédacteurs :

Arnaud DOWKIW (INRA), Jérôme ROUSSELET (INRA), Stéphanie BANKHEAD (Univ. Orléans)

Ce projet avait pour objectif de déterminer le rôle des arbres ornementaux dans la circulation de micro-organismes phytopathogènes et insectes envahissants entre zones urbaines et territoires ruraux. Une des originalités de ce projet résidait dans son grain d'étude, à travers la prise en compte des arbres isolés non inventoriés dans les continuités écologiques entre paysages de la région Centre.

Les organismes étudiés étaient la chenille processionnaire du pin, la rouille foliaire à *Melampsora larici-populina* des peupliers et mélèzes et le puceron lanigère du peuplier.

Le programme de travail était organisé en 7 tâches réparties en trois groupes :

- **Groupe de tâches « Inventaire des arbres hôtes »**

Tâche 1 – Inventaire géoréférencé des arbres en ville du nord de l'agglomération orléanaise

Tâche 2 – Recensement par sondage dans les écopaysages non forestiers de la région Centre

Tâche 3 – Identification moléculaire des mélèzes et des peupliers

- **Groupe de tâches « Distribution des espèces associées »**

Tâche 4 – Processionnaire du pin

Tâche 5 – Puceron lanigère du peuplier

Tâche 6 – Rouille du peuplier

- **Tâche de communication**

Tâche 7 – Gestion du projet, base de données, transfert

Les principales conclusions de ce projet sont :

- Une forte contribution du patrimoine arboré privé dans les continuités écologiques en ville (et à l'interface milieu urbain / milieu rural)
- Une très faible variabilité génétique des peupliers d'ornement dans nos paysages ruraux et urbains, avec la prédominance du peuplier d'Italie et de ses descendants
- Un rôle majeur des arbres ornementaux dans la forte perméabilité de la Beauce à la dispersion de la processionnaire du pin
- Les populations de puceron lanigère du peuplier en Centre-Val de Loire sont issues de l'émergence récente de populations locales, et non de la dispersion d'une population méridionale.
- Le milieu urbain met bien en présence les deux hôtes de la rouille du peuplier à *Melampsora larici-populina* en dehors de leur aire commune naturelle et le champignon est en mesure d'y boucler son cycle biologique.

En plus de ces résultats scientifiques, les auteurs aimeraient souligner que ce projet a été formateur pour un grand nombre d'étudiants/CDD – dont plusieurs sont issus de formations de Région Centre et que c'est une fierté partagée que beaucoup d'entre eux aient décroché un emploi suite à leur participation à ce projet.

Nom	Formation	Participation au projet ADRIEN (statut et dates)	Situation après le projet
Thomas SERVOUSE	LEGTA, Nogent sur Vernisson	CDD (INRA AGPF), 01/03/2012-31/08/2012	Fonctionnaire, INRA (Orléans)
Anthony VENON	ENFA Toulouse (préalablement BTS Jacques Monod St Jean Braye)	Stagiaire LP (INRA AGPF), 31/03/2014-15/08/2014	Fonctionnaire, INRA (Versailles)
Vanessa IMBAULT	Master BOPE, Université d'Orléans	CDD (INRA URZF) 01/11/2012-30/06/2013 01/11/2013-31/03/2014 CDD (INRA AGPF), 01/01/2015-28/02/2015	CDI, FREDON Centre
Marie BERTELOOT	LEGTA, Nogent sur Vernisson	CDD (INRA AGPF), 01/02/2013-31/07/2013	CDI, reconversion professionnelle
Thomas BOURGEOIS	BTS Jacques Monod St Jean Braye	CDD (INRA AGPF), 22/07/2013-21/08/2013	Fonctionnaire, INRA (Versailles)
Julien CLEMOT	Université d'Orléans	CDD (Université d'Orléans, LBLGC), 26/05/2012-30/6/2012	CDD, reconversion professionnelle
Florie MIARD	Université de Corse (Maîtrise IUP Génie Environnement)	CDD (Université d'Orléans, LBLGC), 15/10/2012-16/12/2012 ; 08/06/2013-21/06/2013	Fonctionnaire, Université d'Orléans
David de FERAUDY	Université d'Orléans	CDD (Université d'Orléans, LBLGC), 01/09/2014-07/11/2014	CDD, entreprises en région Centre-Val de Loire
Simon LAUBRAY	Master BOPE, Univ. d'Orléans	Stagiaire M2 (INRA URZF) 01/10/2012- 23/11/2012 + 28/01/2013 – 10/06/2013 (classé 2 ^{ème} de sa promotion pour la note de stage)	Master toxicologie de l'environnement, Université du Maine
Antoine CHAUVEAU	Master BOPE, Univ. d'Orléans	Stagiaire M2 (INRA URZF) 01/10/2014- 18/11/2014 + 26/01/2015 – 05/06/2015 (classé 2 ^{ème} de sa promotion pour la note de stage)	Service civique pôle environnement ville de Meung-sur-Loire / parc départemental
Yoann NAVASSE	Master BOPE, Université d'Orléans	Stagiaire M2 (LBLGC Univ. Orléans) 01/10/2012- 23/11/2012 + 28/01/2013 – 10/06/2013 (classé 1er de sa promotion pour la note de stage)	Doctorant depuis le 01/10/2013 INRA UMR IGEPP, Univ. Rennes 1

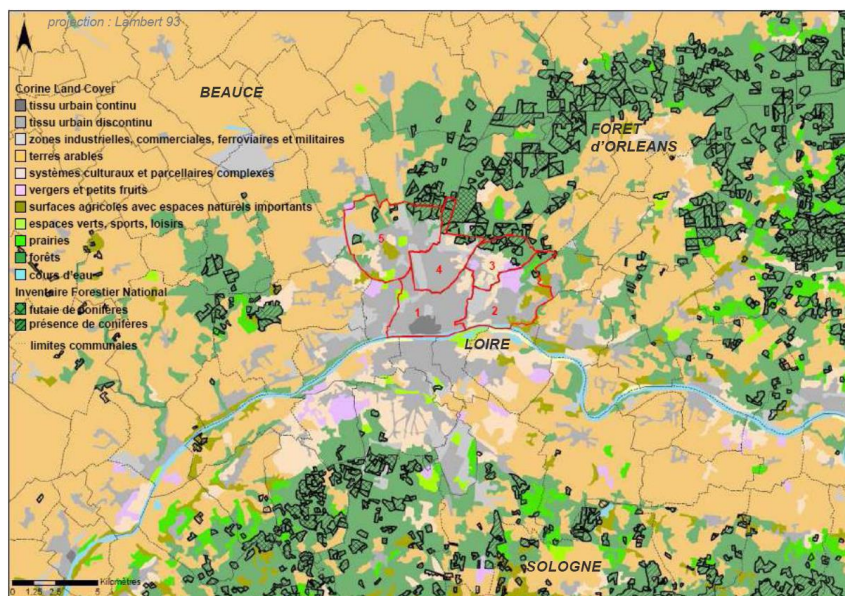
Tâche 1 – Inventaire géoréférencé des arbres en ville du nord de l'agglomération orléanaise

Action 1 : identification botanique et localisation des pins et cèdres (INRA URZF)

⇒ L'objectif de cette action était de géo-référencer les arbres hors forêt (AHF) urbains des genres *Pinus*, *Cedrus* et *Pseudotsuga* à la fois sur le domaine public et privé à l'interface entre l'agglomération Orléans Val de Loire, la Forêt d'Orléans et la Beauce. Ces essences correspondent aux arbres-hôtes potentiels de la processionnaire du pin.

Méthode suivie et zone couverte par l'étude

L'inventaire a été réalisé du 1^{er} novembre 2012 au 21 juin 2013. Les arbres à feuillage persistants sont plus faciles à repérer en automne-hiver, et cette saison correspond également à la période de plus forte détectabilité des nids de processionnaire du pin. Le choix définitif de la méthode d'inventaire et des informations collectées sur le terrain a été arrêté lors du comité de pilotage du 04/12/2012 sur la base (i) du retour d'expérience de la campagne d'inventaire des peupliers et mélèzes réalisée précédemment au printemps 2012 (voir Action 2) et (ii) du bilan d'une première prospection sur un territoire urbain de 387 ha. La principale différence par rapport à l'inventaire des peupliers et mélèzes a ainsi été la décision de collecter dès le terrain des informations en matière **d'usage du sol** pour faciliter le travail d'analyse ultérieur. Le détail de la méthodologie suivie est présentée dans une publication à destination des professionnels des espaces verts (Rousselet *et al.*, 2013, *AFPP*), dans un mémoire de master 2 (Chauveau 2015, Université d'Orléans), et dans une publication scientifique (Rossi *et al.*, soumis à *Urban Forestry & Urban Greening*). Il est à noter que l'ensemble des observations a été réalisé depuis le domaine public, depuis des points hauts (cathédrale par ex.) ou avec accord des propriétaires pour les terrains privés qui ne permettaient pas l'identification des arbres depuis la voie publique.



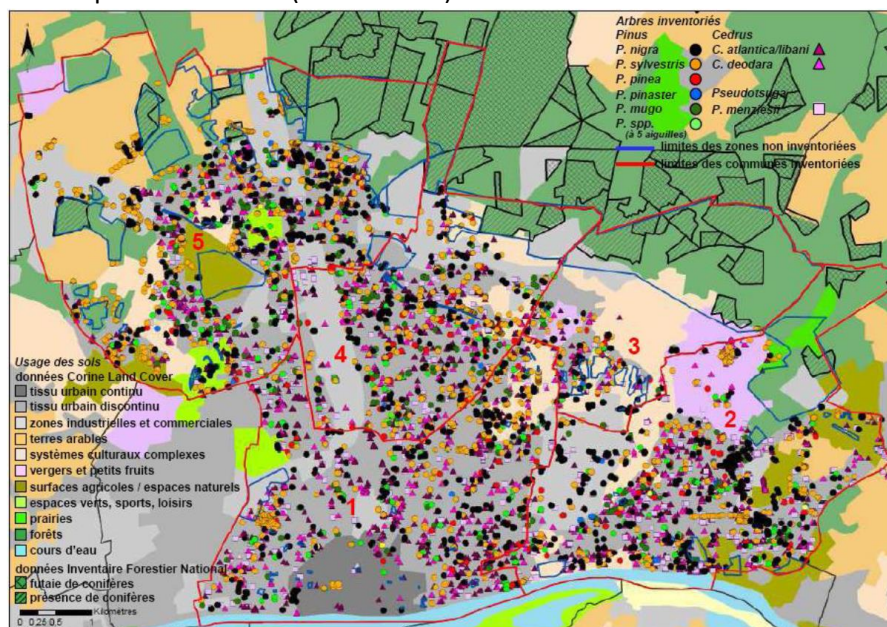
Usage des sols dans l'environnement de l'agglomération orléanaise et localisation géographique de la zone d'inventaire de la processionnaire du pin et de ses arbres-hôtes potentiels : en rouge, limites des cinq communes inventoriées (1. Orléans, 2. Saint-Jean-de-Braye, 3. Semoy, 4. Fleury-les-Aubrais, 5. Saran)

Cinq communes documentant un gradient cœur/périphérie de ville ont pu être inventoriées à l'interface ville/champ/forêt : Saint-Jean-de-Braye, Fleury-les-Aubrais, Saran, Orléans nord, Semoy (voir figure ci-dessous). L'objectif minimal d'inventorier les trois communes partenaires, correspondant à la périphérie de l'agglomération, et Orléans nord, correspondant à son cœur dense a pu être atteint, mais la zone inventoriée n'a pas pu être aussi large que pour les peupliers et mélèzes (voir Action 2), principalement du fait des informations supplémentaires collectées (comptage des nids de processionnaire et identification du type de terrain) et des conditions météorologiques et de lumière. L'inventaire des AHF hôtes de la processionnaire du pin à Semoy a permis de compléter l'interface ville/forêt d'Orléans. L'interface ville/Beauce n'a été documentée que par l'inventaire de Saran (et les communes plus au nord inventoriées dans le cadre de la Tâche 2). Ormes, Ingré, Saint-Jean-de-la-Ruelle n'ont pas pu être inventoriées dans le cadre du budget disponible, l'effort d'inventaire en milieu urbain ayant déjà nécessité la réallocation de 2 mois de CDD de la Tâche 2 vers la Tâche 1.

Résultats obtenus

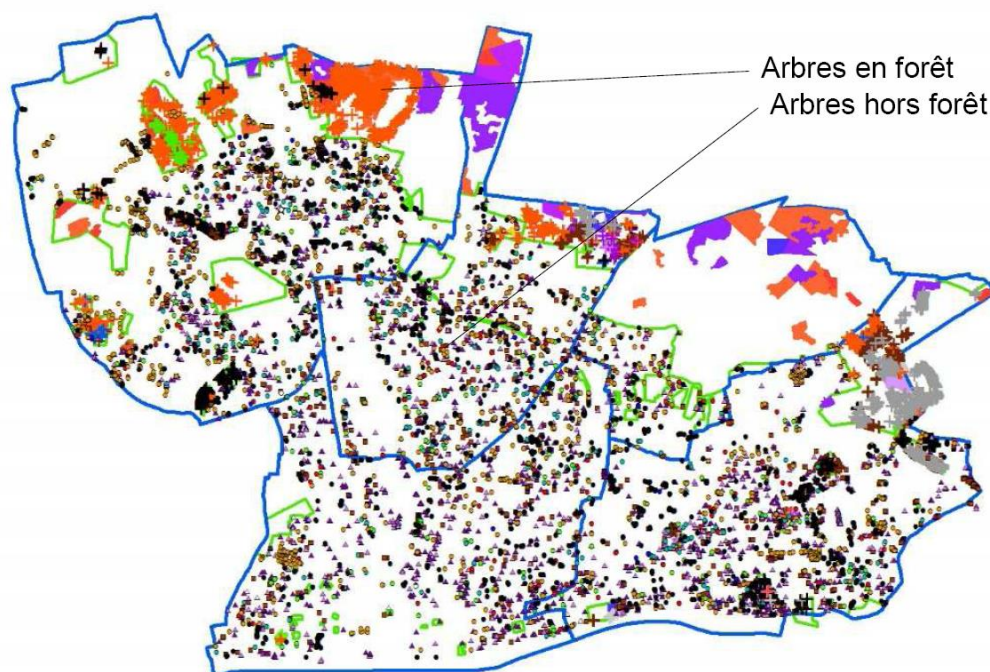
Le territoire des cinq communes de la zone d'étude correspond à 6493 ha dont 4914 ha ont été inventoriés exhaustivement. Les 1579 autres ha correspondent à des parcelles forestières qu'il n'était pas prévu d'inventorier ou à des terrains auxquels nous n'avons pas pu avoir accès (« zones d'ombre »). Ce sont au final 9321 arbres hôtes potentiels de processionnaire du pin, présents sous forme d'arbres isolés, d'alignement ou de petits bosquets, qui ont été recensés.

La première version de la base de données cartographique qui a été produite dans le cadre du projet ADRIEN correspond donc à la couche « SIG » référençant spatialement les arbres inventoriés sur ces 4914 ha, ainsi que les zones d'ombre (voir figure ci-dessous). La table attributaire contient les informations suivantes : genre, espèce, hauteur, type de terrain, plus des informations relatives à la présence de nids de processionnaire (voir Tâche 4).



Distribution des arbres-hôtes de la processionnaire du pin dans le nord de l'agglomération orléanaise (1. Orléans, 2. Saint-Jean-de-Braye, 3. Semoy, 4. Fleury-les-Aubrais, 5. Saran) : en rouge, limites des communes inventoriées ; en bleu, limites des territoires non encore inventoriés à l'intérieur de ces communes ; chaque cercle de couleur représente un pin, chaque triangle un cèdre et chaque carré un douglas. Les zones hachurées correspondent à des parcelles recensées par l'Inventaire Forestier National où des conifères sont présents.

Une seconde version est en cours d'élaboration (Figure ci-dessous). La table attributaire intégrera les informations plus précises en matière de type de terrain obtenues dans le cadre de l'Action 3. En effet le régime foncier de toutes les parcelles cadastrales sur lesquelles se trouvent des AHF hôtes de la processionnaire a été déterminé dans le cadre d'un stage de master 2 BOPE de l'Université d'Orléans (2014-2015), financé par le projet Sésame (2013-2015, Métaprogramme SMaCH de l'INRA). Les zones à risques (présence d'arbres hôtes potentiels de la processionnaire du pin dans des établissements scolaires, périscolaires, ...) y sont notamment plus précisément déterminées. Les zones forestières et les zones d'ombre de la zone d'étude (à l'exception des terrains militaires) ont pu également être inventoriées avec l'appui de ce projet complémentaire afin d'ouvrir un autre champ d'analyses nécessitant une exhaustivité des données sur la zone considérée. Ces données seront intégrées à une nouvelle version de la base SIG.



Deuxième version de l'inventaire en cours d'élaboration incluant les arbres en forêt et diminuant le nombre de zones d'ombre (en vert)

Action 2 : localisation des peupliers et mélèzes (INRA AGPF)

- ⇒ **L'objectif de cette tâche était de référencer les espèces hôtes de la rouille du peuplier à *Melampsora larici-populina*.**

Ce champignon microscopique, parasite du feuillage et problème majeur de la populiculture française, alterne entre deux essences hôtes. Il se développe au printemps sur mélèze, où il effectue une phase de reproduction sexuée. Il ne provoque généralement aucun dégât notable sur cet hôte vu la brièveté de son passage. Ses spores sont ensuite dispersées par le vent sur les peupliers où il effectue plusieurs cycles de reproduction asexué dans un processus épidémique. Toutes les espèces de peuplier ne sont pas hôtes ce champignon, il en est ainsi des peupliers blancs, trembles et grisards (blanc x tremble). Cependant, et suivant ainsi les recommandations des évaluateurs du projet, toutes les espèces de peupliers - y compris les trois précitées - ont été concernées par l'inventaire.

Méthode suivie et zone couverte par l'étude

S'agissant du premier inventaire réalisé dans le cadre du projet, le temps nécessaire à sa réalisation pouvait être difficilement estimé. Il était convenu que les trois communes partenaires du projet (Fleury les Aubrais, Saran, St Jean de Braye) soient traitées en priorité. Mais au final, ce sont 11 communes qui ont été inventoriées. L'inventaire est allé au-delà des limites administratives de l'Agglo, à l'ouest ainsi qu'au nord, permettant ainsi d'effectuer la jonction avec la zone d'étude dite « Beauce » :

Commune	Partenaire du projet	Superficie couverte
Fleury les Aubrais	Oui	1016 ha
Saran	Oui	2029 ha
Saint Jean de Braye	Oui	1371 ha
Orléans (centre urbain dense et difficilement visible exclu)	Non, mais invitée aux COPILs et COTECHs	1041 ha
Bucy St Liphard		1783 ha
Chaingy	Non	2165 ha
Ingré	Non	2077 ha
La Chapelle St Mesmin	Non	890 ha
Ormes	Non	1822 ha
Semoy	Non	774 ha
Saint Ay	Non	1030 ha
Saint Jean de la Ruelle	Non	609 ha
TOTAL		➤ 16 607 ha

La période durant laquelle la rouille du peuplier peut être observée étant limitée et sa recherche pouvant être très chronophage, il a été convenu que l'inventoriste ne s'y consacrerait pas. Concernant l'identification botanique, la typologie utilisée sur le terrain était la suivante :

Genre	Espèce	Type	Sexe
Larix	<i>Decidua (Europe)</i>		
	<i>Kaempferi (Japon)</i>		
	<i>x marschlinsii (Eur. x Jap.)</i>		
Populus	<i>Nigra</i> (noir)	Fastigié / -	Mâle / Femelle / -
	hybride	Euraméricain / Interaméricain / -	Mâle / Femelle / -
	<i>canescens</i> (grisard)		
	<i>tremula</i> (tremble)		
	inconnu		

La hauteur des arbres a été appréciée visuellement et renseignée selon 3 catégories (0-5 m, 5-10m, 10-15m). Le statut de propriété a été renseigné selon une typologie très simple (considérablement enrichie pour les inventaires ultérieurs) : public / privé.

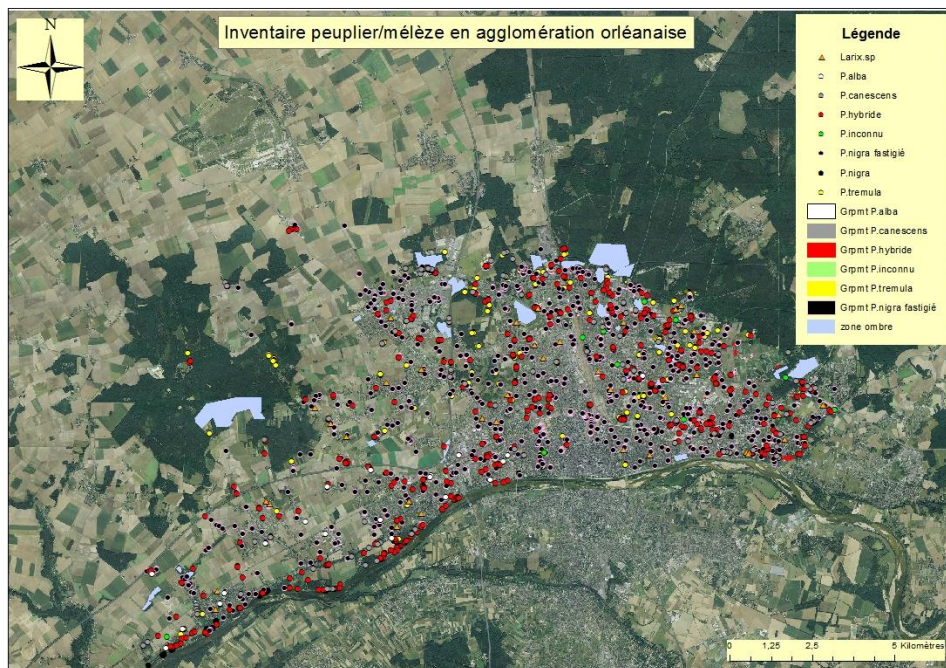
Certaines zones non accessibles ont été catégorisées en « zones d'ombre ». Les arbres formant des groupes de types similaires ont été géoréférences comme « groupements » plutôt que points. Leur individualisation sera effectuée par un processus automatique de génération de points avant fourniture des couches de données d'inventaire aux communes partenaires.

Résultats obtenus

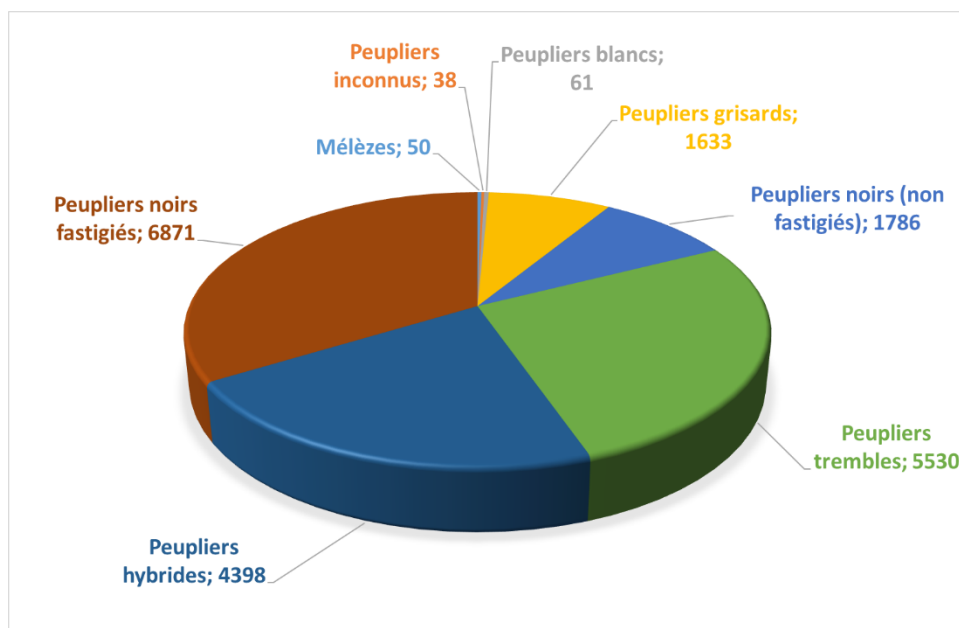
Ces sont 21 804 arbres qui ont été inventoriés dans cette tâche soit 1,3 / ha. Deux résultats sont conformes à ce qui était attendu :

- avec 45 arbres inventoriés, les mélèzes constituent l'essence la plus rare de l'inventaire.
- avec 32% du total, les peupliers noirs fastigiés constituent le type prédominant

Les espèces non hôtes de *Melampsora larici-populina* (blancs, grisards et trembles ; inventoriés en supplément du projet initial) représentent un tiers du total des peupliers inventoriés.



Inventaire des arbres dispersés de type peupliers et mélèzes en milieu urbain



Répartition des peupliers et mélèzes en milieu urbain par types botaniques

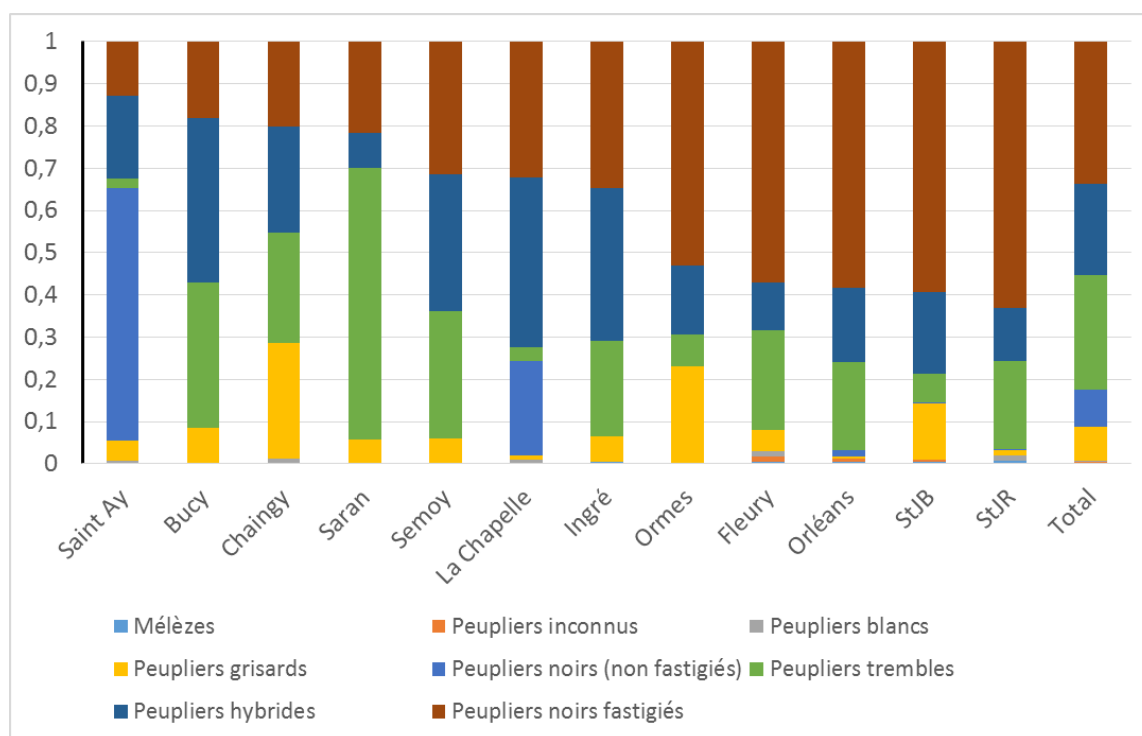
Action 3 : analyse paysagère des données d'inventaire en ville (INRA AGPF, INRA URZF)

⇒ L'objectif de cette action était de décrire la diversité de la matrice des arbres en ville mais également de fournir des indicateurs de leur répartition en vue d'une modélisation.

Analyses descriptives

Peupliers et mélèzes

On observe de fortes disparités entre communes pour la composition en types botaniques de peupliers.



Diversité des types botaniques (peupliers essentiellement) dans les communes de l'inventaire urbain. Les communes sont classées par ordre croissant d'importance relative des peupliers noirs fastigiés.

La distribution des peupliers noirs fastigiés interpelle. En effet, sa fréquence relative est beaucoup plus variable entre communes que ce que nous aurions imaginé pour cette forme de peuplier noir omniprésente dans le paysage français. De plus de 50% à Saint Jean de la Ruelle, Saint Jean de Braye, Orléans, Fleury les Aubrais et Ormes, elle passe sous 20% à Chaingy, Bucy Saint Liphard et Saint Ay.

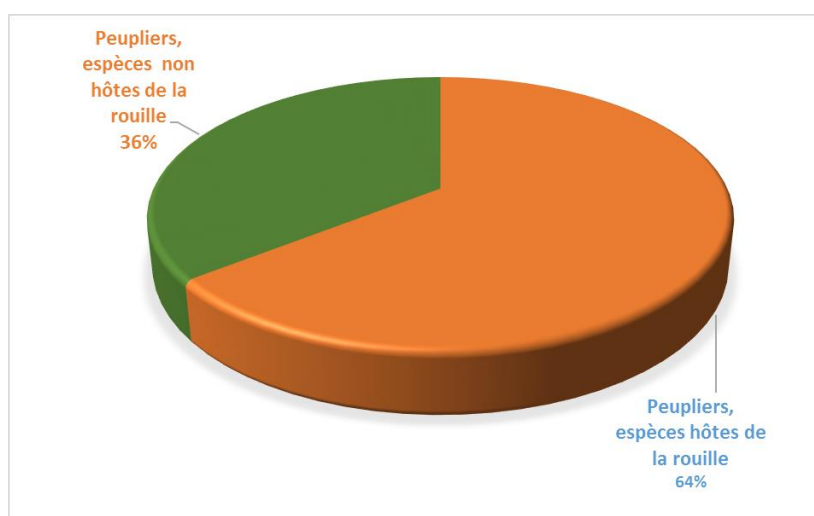
Une telle variabilité justifie de poursuivre la valorisation de ces données par une analyse paysagère approfondie. On peut déjà suggérer des descripteurs paysagers indirects de la présence de plusieurs espèces :

- La Loire et la présence du peuplier noir (non fastigié). On observe une composante « peuplier noir non fastigié » importante dans les communes de Saint Ay et La Chapelle St Mesmin. Ces deux communes ont toutes deux une longue portion de Loire pour frontière sud et le fleuve est l'habitat naturel du peuplier noir. Cependant, l'observation détaillée de la répartition des arbres révèle que la plupart des peupliers noirs non fastigiés de La Chapelle Saint Mesmin sont issus d'une population qui s'est installée sur une friche industrielle à 800m au nord de la Loire, ce qui constitue une surprise.

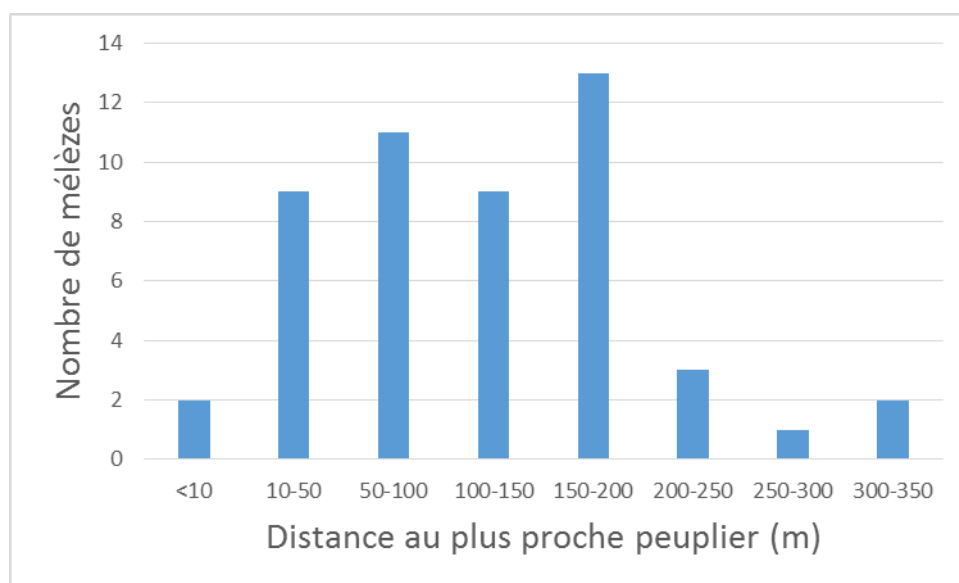
- Les bois et la présence du peuplier tremble. Le peuplier tremble semble être surtout présent dans les communes dont le territoire jouxte ou inclut un espace boisé conséquent : bois de Bucy pour Ormes, Ingré, Chaingy, Bucy St Liphard ; forêt d'Orléans pour Fleury les Aubrais, Saran, Saint Jean de Braye, Semoy. Les communes distantes des massifs forestiers (Saint Jean de la Ruelle, La Chapelle St Mesmin et Orléans) sont beaucoup plus pauvres en peupliers trembles.

Concernant le paysage tel qu'il se présente pour la rouille du peuplier, on peut retenir que :

- près de 2/3 des peupliers inventoriés appartiennent à un type botanique sensible à la rouille
- chaque mélèze inventorié est situé à moins de 350m d'un peuplier d'un type botanique sensible à la rouille, la distance moyenne étant de 117m seulement.

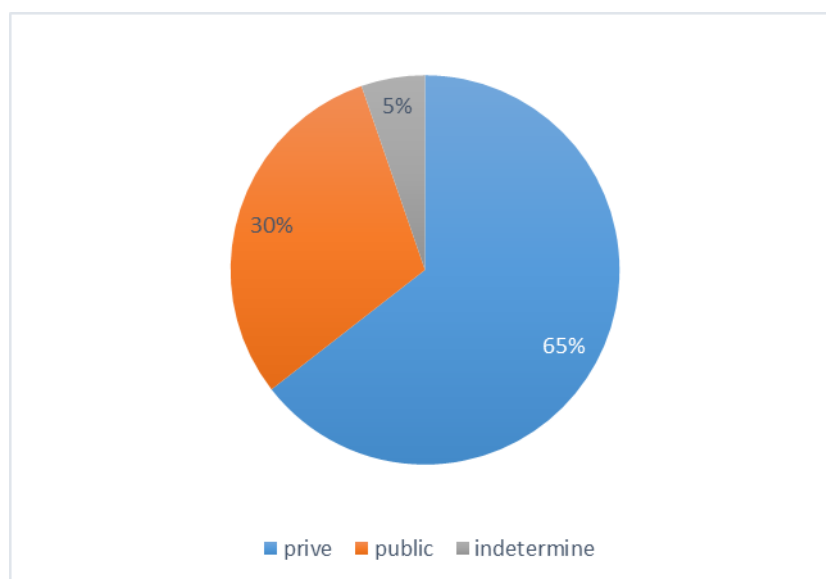


Répartition des peupliers inventoriés en milieu urbain selon qu'ils sont hôtes ou non hôtes de la rouille foliaire à *Melampsora larici-populina*



Distance des mélèzes inventoriés en milieu urbain au plus proche peuplier d'un type botanique sensible à la rouille foliaire à *Melampsora larici-populina*

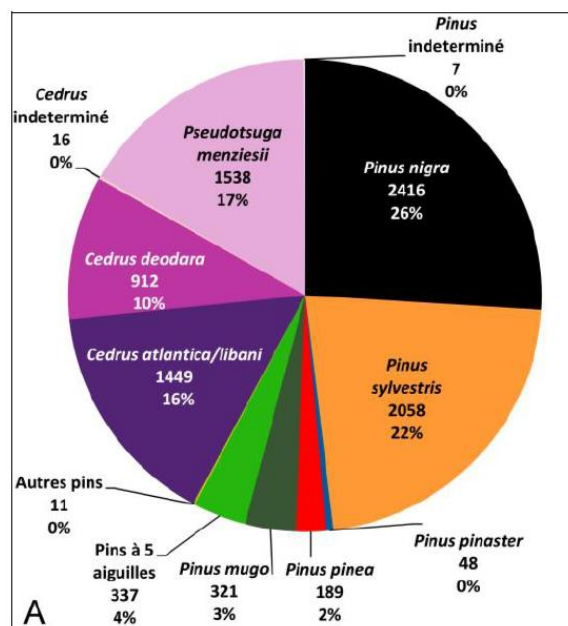
Près de 2/3 des arbres inventoriés sont situés sur des terrains privés. La prise en compte de cette composante du paysage constituait l'une des originalités de ce projet et l'on voit ici son importance.



Statut de propriété des terrains sur lesquels les peupliers et mélèzes urbains ont été inventoriés

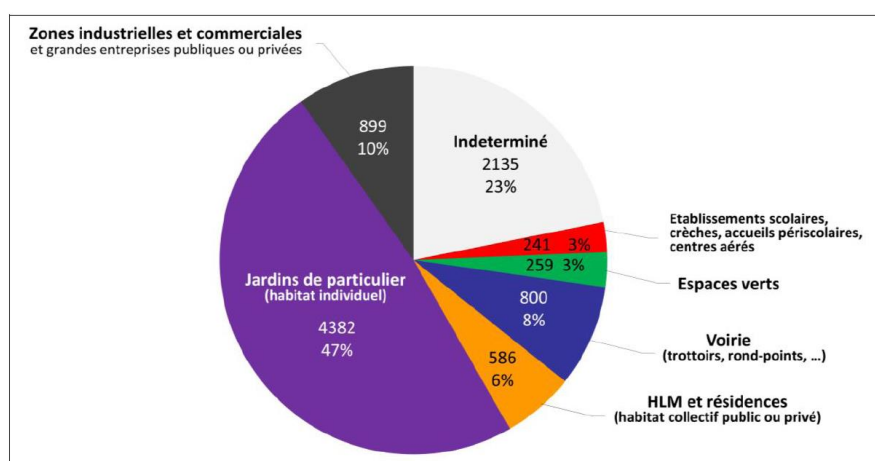
Pins, cèdres, douglas

La densité d'AHF potentiellement hôtes de la processionnaire du pin est d'environ 1,9 arbre à l'ha sur les territoires inventoriés (1,5/ha sur l'ensemble de la zone d'étude). Les essences rencontrées ont été le pin noir (*Pinus nigra*), le pin sylvestre (*P. sylvestris*), le pin maritime (*P. pinaster*), le pin parasol (*P. pinea*), le pin mugo (*P. mugo*), les pins à cinq aiguilles de la section Quinquifoliae du sous-genre *Strobus* (*P. wallichiana*, *P. strobus*, *P. parviflora*, ...), le Cèdre de l'Himalaya (*Cedrus deodara*), le cèdre de l'Atlas (*C. atlantica*) et le cèdre du Liban (*C. libani*) généralement indistinguables, et le Douglas (*Pseudotsuga menziesii*). Le résultat le plus notable de cet inventaire est que le pin noir et le pin sylvestre, qui sont deux des trois essences préférées de la processionnaire sont les plus plantées en milieu urbain. Il est à noter que ces deux essences sont également les deux essences de pins les plus présentes en forêt. La troisième essence préférée, le pin maritime, est quant à elle quasi absente en milieu urbain. Les cèdres, et en particulier de vieux cèdres de l'Atlantique et du Liban, sont très présents, notamment sur la commune de Saint-de-Jean-Braye. Le sapin de Douglas (*P. menziesii*), qui donne des arbres de très grande taille, s'est avéré être présent bien au-delà de ce qu'on pouvait attendre dans le compartiment ornemental urbain. Il est également à noter qu'il est fortement planté en milieu forestier. Pour le pin noir, le pin sylvestre et le Douglas, la question d'un lien entre leur forte présence en milieu forestier et en milieu urbain se pose. Cet inventaire appelle une étude mobilisant les compétences des sciences humaines et sociales et portant sur les motivations des différentes catégories de personnes physiques et morales lors du choix des essences qu'elles plantent (disponibilité sur le marché, prix, facilité de plantation et d'entretien, représentations culturelles, volonté de personnaliser son jardin pour les particuliers, ...).



Proportion des différentes essences parmi les arbres-hôtes de la processionnaire du pin inventoriés dans les communes de Saint-Jean-de-Braye, Fleury-les-Aubrais, Saran, Semoy et Orléans nord

Dans la première version de l'inventaire (qui exclut les territoires forestiers des communes concernées), les jardins de particulier fournissent le plus grand contingent d'Arbres Hors Forêt (à l'exception du cœur de l'agglomération où le bâti est très dense, territoire correspondant à la couche Corine Land Cover « tissu urbain continu »). Notre étude montre que la grande majorité des arbres ornementaux se situent sur le domaine privé, et que cette composante du patrimoine arboré urbain est essentielle à considérer.



Répartition en fonction du type de terrain et de propriété des arbres-hôtes potentiels de la processionnaire du pin recensés dans les communes de Saint-Jean-de-Braye, de Fleury-les-Aubrais, de Saran, de Semoy et d'Orléans (version 1 de l'inventaire)

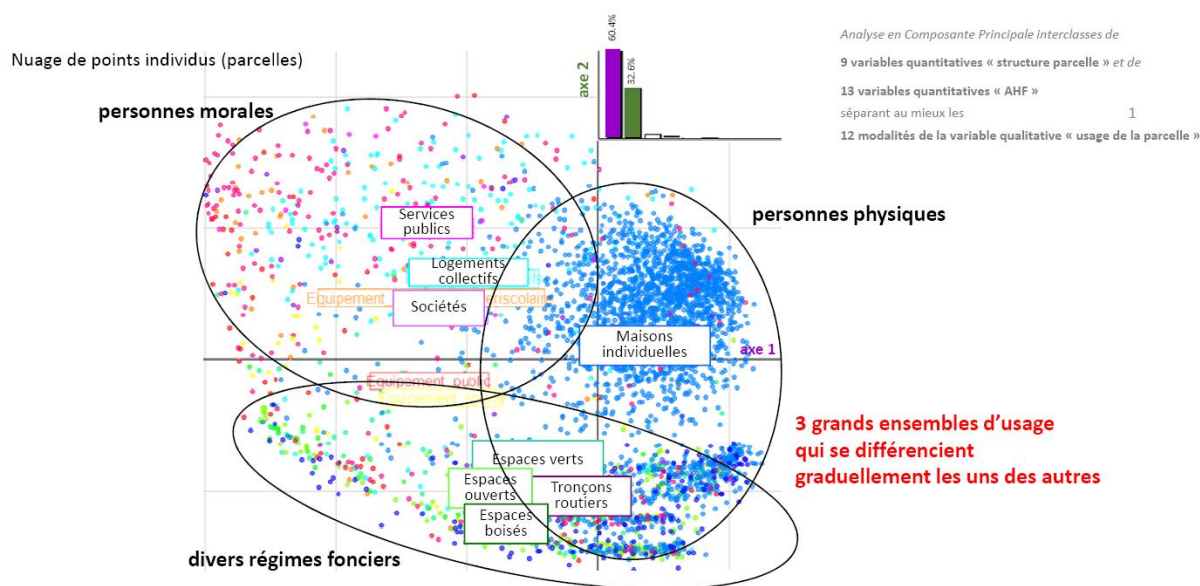
Un stage de master 2 (A. Chauveau, 2014-2015, INRA – Métaprogramme SMACH) a permis de compléter cette analyse avec pour ambition de déterminer avec précision le type de propriétaire pour les 3640 parcelles cadastrales et tronçons routiers hébergeant des AHF hôtes de la processionnaire du pin au sein de la zone d'étude. Les types de parcelles rencontrées sont présentés dans le tableau ci-dessous. Ces données ont été obtenues à partir des informations collectées lors des prospections sur le terrain, via des prospections virtuelles en utilisant Google Street View, des recherches sur internet

et via la consultation du cadastre des communes partenaires ou membres du comité de pilotage (pour plus de détail, voir le rapport de stage sur <http://prodinra.inra.fr/?locale=fr#!ConsultNotice:307122>).

Tableau : moyennes(et erreurs standards) des variables décrivant la structure des parcelles calculées pour l'ensemble des régimes fonciers. Les abbréviations Eq, Esp, Log, MI correspondent respectivement à Equipements, Espaces, Logements et Maisons Individuelles.

Variables	Moyennes +/- Erreurs Standards						
	Nombre de parcelles	Aire des parcelles (m ²)	Périmètre des parcelles (m)	Rapport P/A	Aire des bâtiments (m ²)	% de bâtiments par parcelle	Nombre de bâtiments par parcelle
MI	2475	955.11 +/- 31.72	132.90 +/- 1.49	0.20 +/- 0.00	109.54 +/- 2.27	14.66% +/- 0.23	1.38 +/- 0.02
Réseau routier	169	2694.66 +/- 436.34	370.77 +/- 30.29	0.34 +/- 0.02	159.12 +/- 105.09	1.22% +/- 0.55	0.45 +/- 0.21
Log Collectif	212	4243.74 +/- 340.83	308.01 +/- 13.75	0.12 +/- 0.01	780.17 +/- 63.66	21.43% +/- 1.04	3.63 +/- 0.37
Esp Ouvert	55	5533.98 +/- 1130.93	321.84 +/- 39.48	0.13 +/- 0.01	19.11 +/- 10.35	0.40% +/- 0.23	0.31 +/- 0.13
Esp Vert	86	6013.08 +/- 1251.18	335.57 +/- 42.34	0.17 +/- 0.02	145.27 +/- 88.76	0.81% +/- 0.37	0.70 +/- 0.27
Esp Boisé	208	6313.93 +/- 1822.73	241.92 +/- 22.08	0.18 +/- 0.01	1.01 +/- 0.38	0.08% +/- 0.05	0.05 +/-0.02
Service Public	11	8374.61 +/- 5025.24	348.91 +/- 75.31	0.10 +/- 0.02	2322.08 +/- 1244.39	29.31% +/- 5.02	4.36 +/- 1.66
Eq Scolaire	59	9005.74 +/- 1383.84	390.55 +/- 35.44	0.10 +/- 0.01	1952.77 +/- 401.00	19.82% +/- 2.16	4.68 +/-0.68
Santé	20	9352.76 +/- 3033.25	395.62 +/- 74.06	0.13 +/- 0.03	2260.45 +/- 1096.33	19.94% +/- 4.63	4.70 +/- 1.74
Société	226	11056.40 +/- 1316.17	400.06 +/- 23.60	0.11 +/- 0.01	2484.11 +/- 354.83	19.92% +/- 1.21	2.82 +/- 0.36
Eq Sportif	51	14438.73 +/- 3608.07	486.53 +/- 74.64	0.11 +/- 0.01	687.41 +/- 180.12	3.90% +/- 0.89	2.41 +/- 0.56
Eq Public	68	26589.09 +/-9581.47	617.78 +/- 97.18	0.11 +/- 0.01	1949.93 +/- 569.22	9.34% +/- 1.80	4.19 +/- 1.03

Une analyse en Composante principale (ACP) interclasses des parcelles hébergeant des AHF prenant en compte des variables décrivant la structure de la parcelle, sa position et son voisinage (aire, périmètre, rapport aire/périmètre, distance à différentes couches Corine Land Cover, ...) ainsi que la densité et la diversité des AHF (densité, nombre d'espèces totales, nombre d'espèces très favorables ou peu favorables à la processionnaire du pin) a permis de montrer qu'il y avait 3 grands types de parcelles vis-à-vis des plantations en milieu urbain et périurbain d'AHF hôtes de la processionnaire, correspondant à des parcelles appartenant à des personnes physiques (essentiellement les jardins de maisons individuelles), à des personnes morales privées ou publiques (sociétés, services publics, logements collectifs, ...) et à divers régimes fonciers (espaces verts, espaces boisés, espaces ouverts, tronçons routiers, ...).



Analyse en Composante Principale interclasses

Recherche d'indicateurs paysager

Ces analyses ont été conduites exclusivement sur le jeu de données pins – cèdres - douglas grâce aux informations supplémentaires collectées lors de l'inventaire de terrain et qui ont facilité le développement de cette approche.

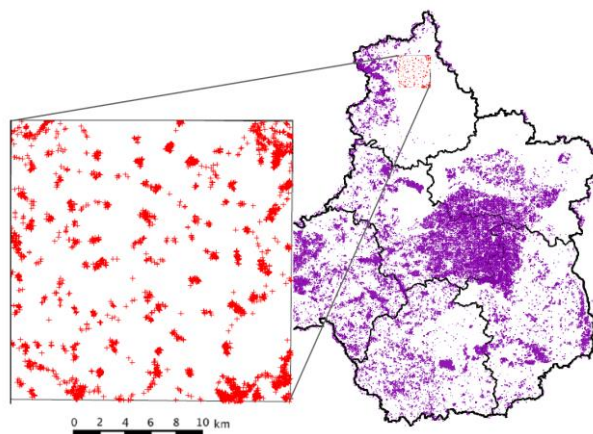
L'approche analogue développée en milieu champêtre (Beauce) a permis de développer un modèle de distribution des AHF basé sur la seule relation avec la distribution du bâti indifférencié (voir Tâche 2 ; Rossi et al, 2015, *Landscape Ecology*). La distance au plus proche bâti (couche « bâti indifférencié » de la BD TOPO de l'IGN) n'était pas applicable en milieu urbain où le bâti de toute nature est omniprésent. La définition d'indicateurs en milieu urbain est toujours en cours. Cette approche s'appuie sur les résultats présentés dans la partie analyse descriptive qui se sont avérés constituer un préalable indispensable (différenciation des types de bâti et de parcelles). Elle fait partie intégrante d'un projet déposé auprès de l'Agence Nationale de la Recherche visant à approfondir le travail mené en Région Centre grâce au projet ADRIEN et à l'élargir à d'autres régions (CLASH). Une nouvelle version de ce projet non retenu à deux reprises mais très bien classé est en cours d'évaluation. Nos premiers résultats obtenus dans le cadre des projets ADRIEN et Sésame montrent que la couche Corine Land Cover « tissu urbain discontinu » (CLC 112) « capture » bien les parcelles « jardins de maison individuelle avec AHF ». A l'échelle régionale, il apparaîtrait ainsi possible de stratifier un modèle de distribution des arbres en se basant sur les couches Corine Land Cover. A une échelle plus fine, des analyses de la structure de la ville, et du voisinage des parcelles avec AHF, seront également conduites pour déterminer si certains éléments des couches d'information déjà disponibles par exemple auprès de l'IGN peuvent permettre de prédire la distribution des AHF.

Tâche 2 «recensement par sondage dans les écopaysages non forestiers de la région Centre»

⇒ L'objectif de cette tâche était de construire un modèle de distribution des AHF dans les écopaysages non forestiers de la région Centre Val de Loire. Il s'agit de prédire la distribution des AHF à large échelle dans des territoires non inventoriés à partir de la mise en évidence de relations spatiales avec des variables déjà décrites et disponibles dans des bases de données géographiques facilement accessibles (IGN, Corine Land Cover, ...).

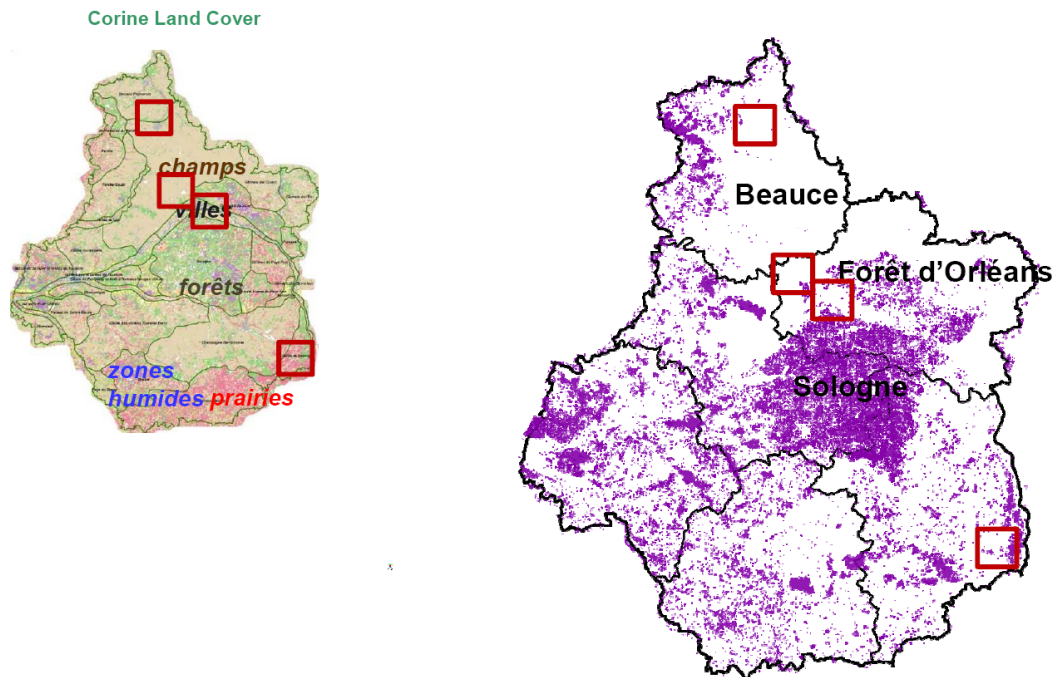
Action 1 : définition de la méthode de sondage (nombre et taille des zones sondées) (INRA URZF, INRA CBGP)

Il s'agissait de déterminer le nombre et la taille des zones inventoriées exhaustivement nécessaires à la construction du modèle. Deux options ont été envisagées : échantillonner un grand nombre de petites zones couvrant largement la diversité du territoire régional ou un petit nombre de grandes zones permettant d'appréhender correctement la distribution des AHF au sein de celles-ci. A partir d'un inventaire exhaustif sur une vaste zone de près de 500 km² (22 x 22 km) dans le Thymerais (au nord de la Beauce), il est apparu que des fenêtres d'une taille minimale de 10 X 10 à 15X 15 km étaient nécessaires. Cette stratégie d'échantillonnage a été validée lors du copil du 04/02/2012. Le nombre de fenêtres d'échantillonnage a surtout été conditionné par les moyens disponibles après l'inventaire en milieu urbain (mois de CDD restants). L'obtention du projet Sésame (métaprogramme INRA SMaCH) apportant des financements complémentaires en matière de budget de fonctionnement a permis sur le projet ADRIEN de transférer 5300 EUR de fonctionnement (frais de déplacement) en personnel. Les 2 mois de CDD supplémentaires ainsi obtenus ont permis de compenser les 2 mois transférés de la tâche 2 à la tâche 1 (voir action 1, tâche 1). Toutefois, seules deux fenêtres d'échantillonnage étaient envisageables au regard de l'effort d'échantillonnage à réaliser et des moyens disponibles. Il a été choisi d'inventorier deux éco-paysages différents avec des zones d'inventaire identique pour toutes les essences (copil du 04/02/2012). La première se situe en Beauce et est adjacente aux communes de l'agglomération orléanaise inventoriées. Elle est complémentaire de la zone du Thymerais car cette nouvelle phase d'échantillonnage dans un milieu d'open-fields permet la validation du modèle en milieu champêtre. En outre, elle permet de mieux caractériser l'interface territoire urbain / territoire rural. La seconde est située en Vallée de Germigny dans une zone à dominante prairiale. Il s'agit de savoir si la distribution des AHF est dépendante du type de milieu. Afin d'augmenter la puissance d'échantillonnage et le nombre d'éco-paysages étudiés, nous avons déposé un projet (DIVA-ADRIEN) à un APR du Ministère de l'Ecologie (APR DIVA) mais ce projet n'a pas été retenu.



A gauche, AHF (en rouge) inventoriés dans la parcelle de 22 x 22 km utilisée pour la définition des zones

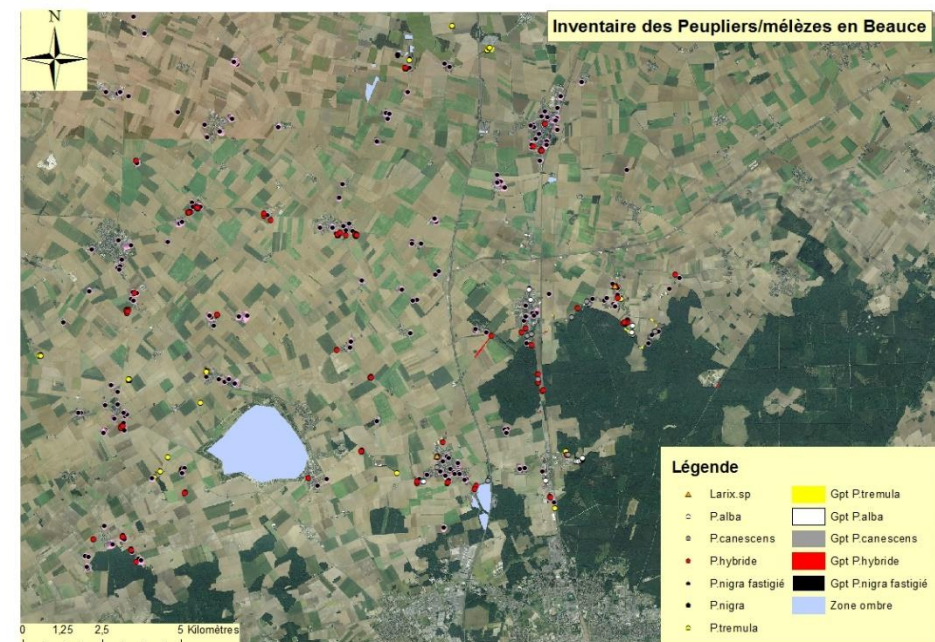
d'échantillonnage ; à droite localisation au sein de la région Centre Val de Loire de cette parcelle située dans le Thymerais entre Chartres et Dreux (en violet, parcelles de conifères > 2,25 ha recensées par l'IFN)



Localisation des zones d'échantillonnage retenues : à gauche, sur fond Corine Land Cover ; à droite sur fond Inventaire Forestier National (parcelles de conifères > 2,25 ha)

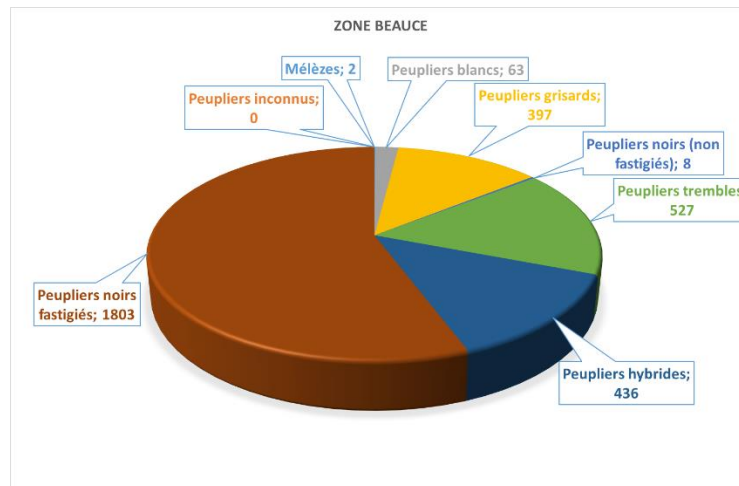
Action 2 : localisation des peupliers et mélèzes (INRA AGPF)

La zone inventoriée en Beauce couvre environ 30 000 ha, dont une grande « zone d'ombre » non inventoriée correspondant à la base militaire de Bricy. Un total de 3236 peupliers et mélèzes dispersés ont été inventoriés, ce qui correspond à une densité de 0,11 / ha. Pour mémoire, la densité en milieu urbain (Tâche 1) était dix fois plus élevée (1,3 / ha).



Répartition des peupliers et mélèzes dans la zone d'étude dite « Beauce »

Seuls deux mélèzes ont été repérés. Comme en milieu urbain, le type dominant correspond aux peupliers noirs fastigiés. Cette prédominance y est encore plus élevée puisqu'ils représentent plus de la moitié des arbres inventoriés.



Répartition des types botaniques peupliers et mélèzes en zone d'étude dite « Beauce »

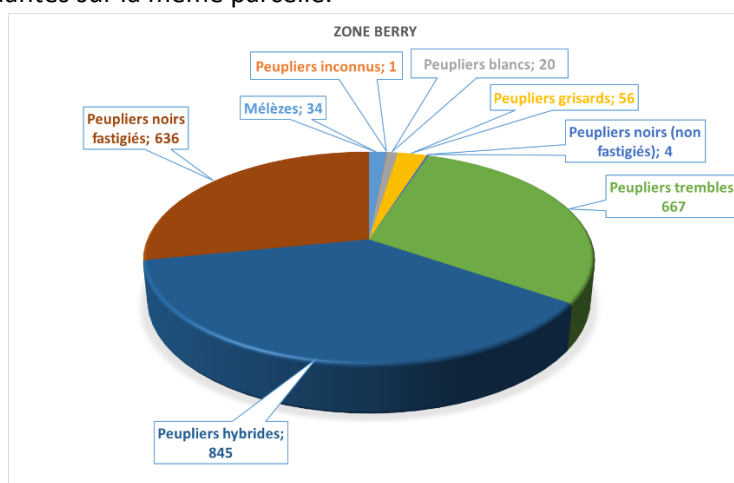
La zone inventoriée dans le Berry couvre environ 10 000 ha. Un total de 2263 peupliers et mélèzes dispersés ont été inventoriés, révélant ainsi une densité deux fois plus élevée qu'en Beauce (0.23 / ha)



Répartition des peupliers et mélèzes dans la zone d'étude dite « Berry »

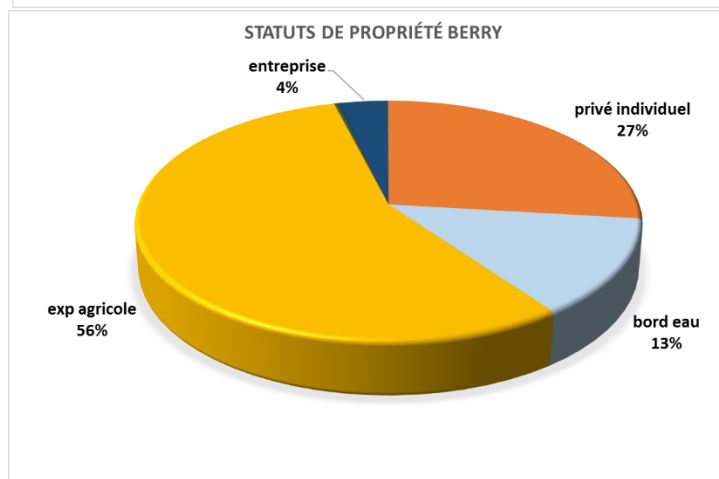
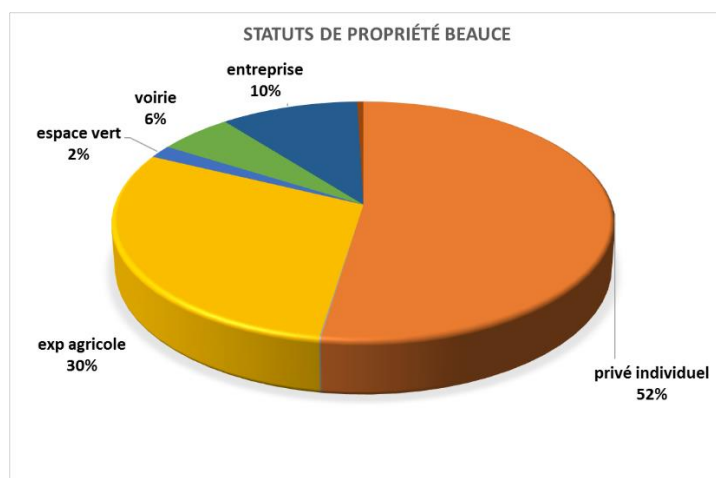
Contrairement aux deux autres paysages étudiés, ce sont ici les peupliers hybrides qui dominent. On peut faire l'hypothèse qu'il s'agit là de reliquats de peupleraies de production très présentes dans ce

paysage. Concernant les mélèzes (34 individus), seul un d'entre eux est un véritable arbre isolé, les autres étant tous plantés sur la même parcelle.



Répartition des types botaniques peupliers et mélèzes en zone d'étude dite « Berry »

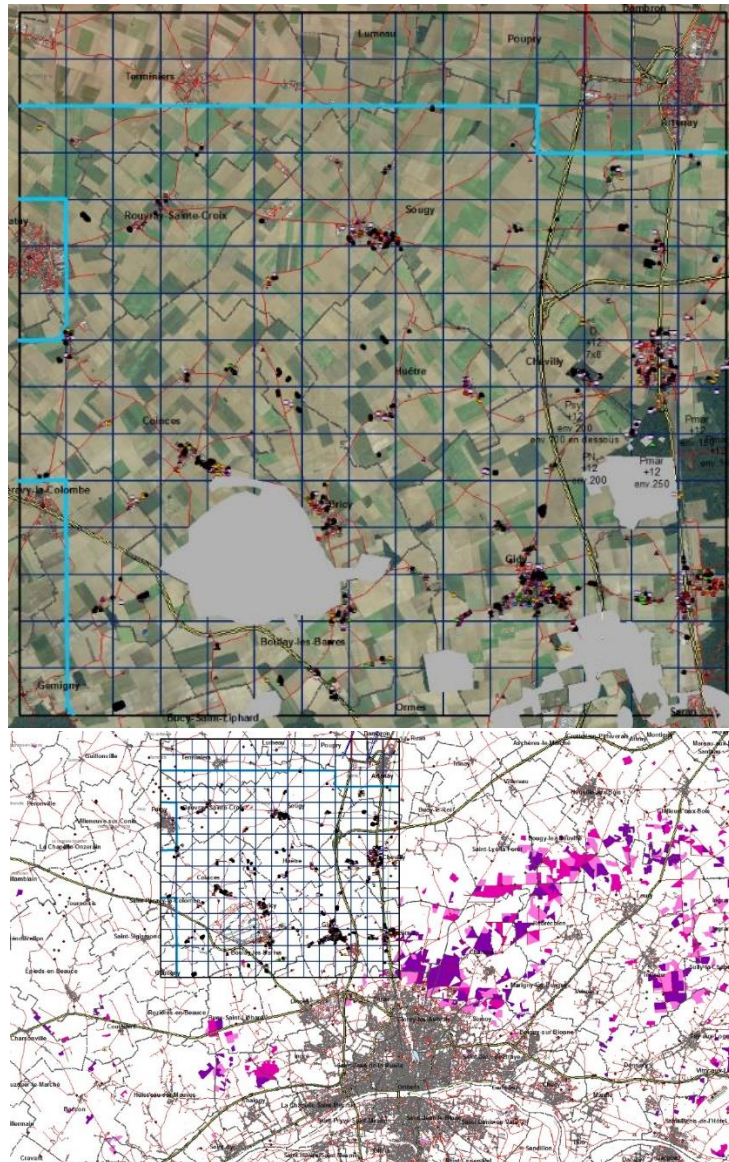
Une typologie du statut de propriété plus élaborée que celle mise en œuvre en milieu urbain (Tâche 1) a été utilisée pour ces deux inventaires. Ceci permet de constater que la part du privé individuel dans la contribution aux peupliers dispersés est dominante en Beauce alors que dans le Berry ce sont les exploitations agricoles qui fournissent le principal apport. Ceci peut s'expliquer par des types d'agriculture contrastés : openfields en Beauce vs. bocage dans le Berry.

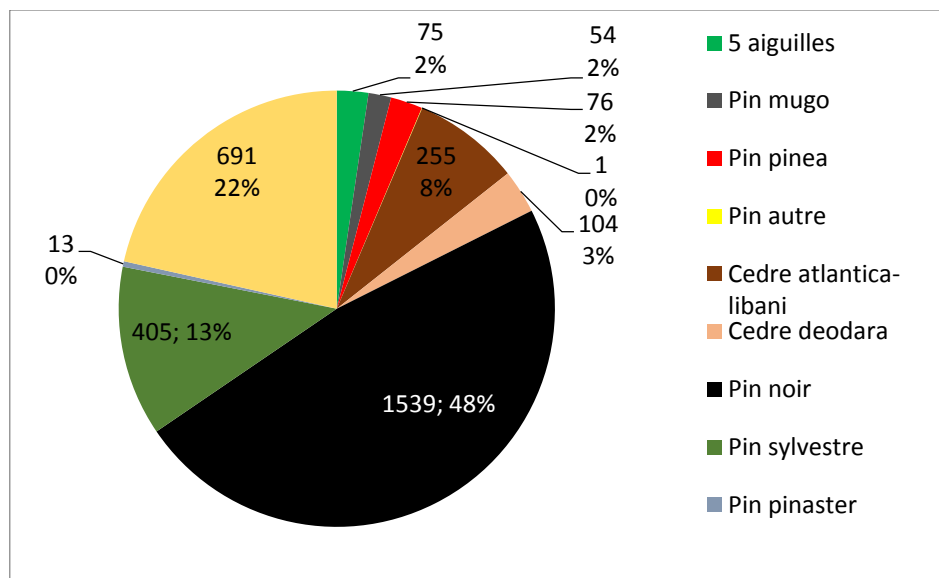


Statuts de propriété des terrains portant peupliers et mélèzes dans les deux zones d'étude

Action 3 : identification botanique et localisation des pins et cèdres (INRA URZF)

Les deux figures ci-dessous présentent les résultats de l'inventaire respectivement en Beauce et en Vallée de Germigny. Dans les deux cas, pins, cèdres et douglas sont essentiellement présents dans des zones bâties (villes, villages et hameaux) indiquant que les AHF potentiellement hôtes de la processionnaire du pin sont essentiellement des arbres ornementaux et non des petites plantations de production (d'une taille non inventoriée par l'IFN à savoir 2,25 ha dans la version 1 de l'inventaire forestier, et 0,5 ha dans la version 2). Les zones artificialisées ne sont généralement pas prises en compte lors des inventaires de l'IFN (que ce soit lors de l'inventaire des parcelles forestières à l'échelle nationale ou lors des inventaires d'AHF dans les régions où ils existent). Nos résultats indiquent que cela conduit probablement à sous-estimer les continuités écologiques pour certaines espèces (voir Action 4). En outre, la processionnaire du pin étant héliophile, les arbres isolés sont propices à son développement (en forêt, les attaques se concentrent d'ailleurs sur les lisières tandis que le cœur des massif dense est peu favorable).

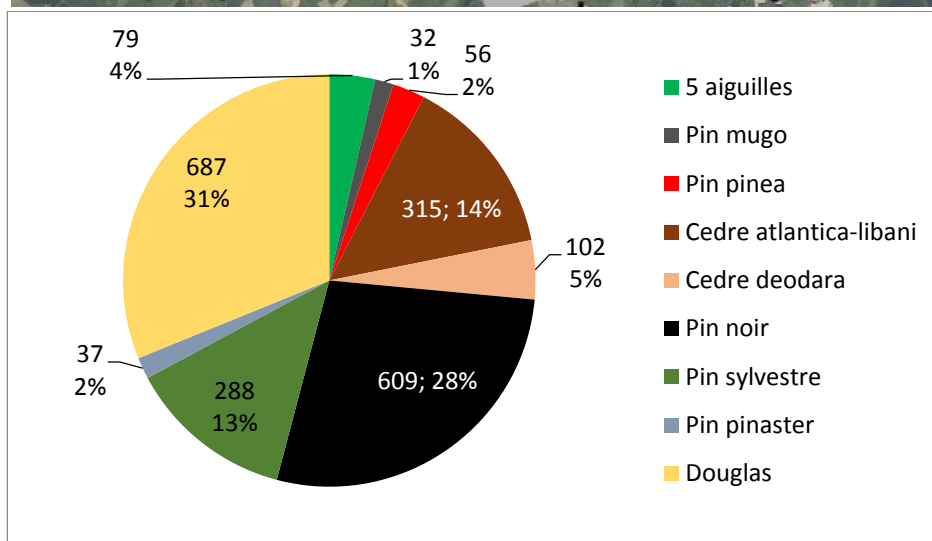
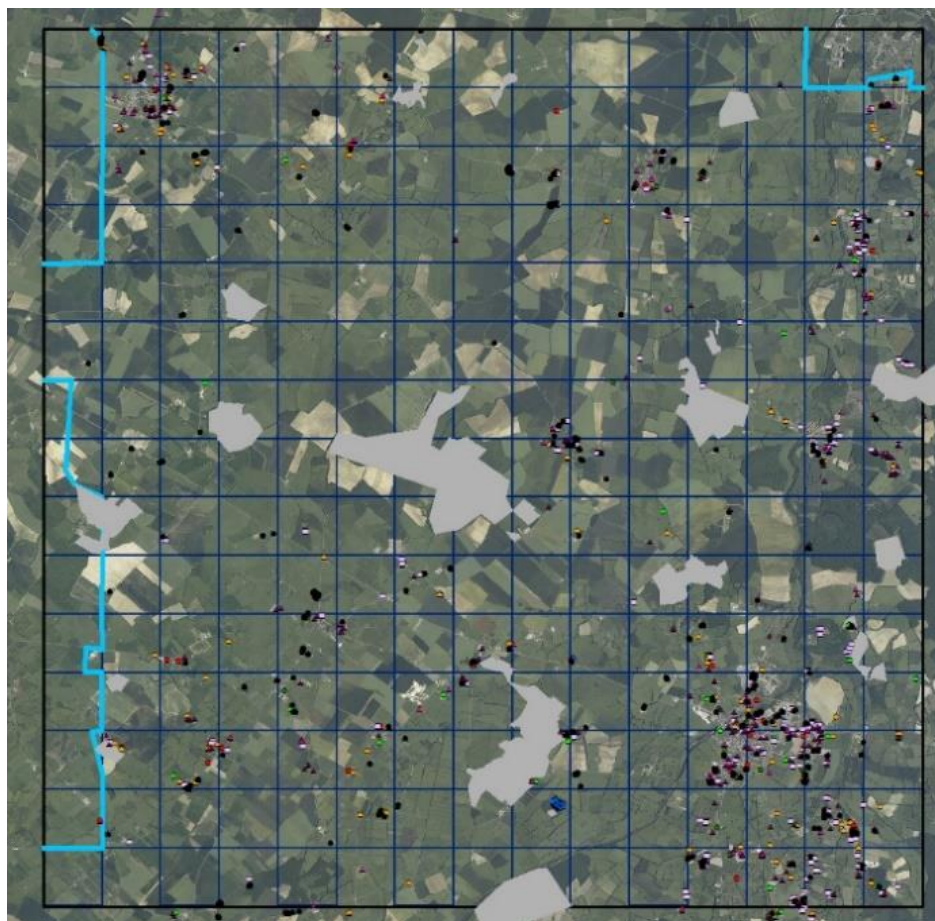




En haut : pins, cèdres et douglas dans la zone d'échantillonnage de Beauce (15 x 15 km) au nord-est de l'agglomération Orléanaise (en gris zones forestières inventoriées par l'Inventaire Forestier National et/ou zones militaires ; en bleu clair, limites des territoires inventoriés) ; au centre, localisation de la zone d'inventaire par rapport à l'agglomération Orléanaise et aux parcelles de conifères pures ou en mélange inventoriées par l'IFN ; en bas : proportion des différentes essences recensées

En milieu champêtre, comme en milieu urbain, les deux essences les plus plantées sont les essences préférées de la processionnaire (au total 61% de pins noirs et de pins sylvestres au sein des arbres hôtes potentiels de la processionnaire). Une évolution des pratiques ornementales, à travers un choix différent d'essences, apparaît clairement comme une des premières pistes d'action pour réduire les risques sanitaires associés avec cette espèce.

C'est en milieu prairial que la proportion d'essences très favorables à la processionnaire est la plus faible (41% de pins noirs et sylvestres). L'essence la plus plantée est même le douglas qui est de très loin l'essence potentiellement hôte la moins favorable à la processionnaire du pin. Reste à savoir si ceci est propre à cette région ou lié à ce milieu. Si ceci était plus généralement caractéristique des milieux prairiaux, il serait intéressant de comparer les différences de déterminants économiques et culturels en matière de plantation avec les milieux champêtres et urbains. Dans cette zone prairiale, il apparaît que ce sont les animaux présents dans des prés à proximité des habitations (ou des lisières forestières de conifères non étudiées ici) qui ont principalement des risques de contact et de réactions à la processionnaire.

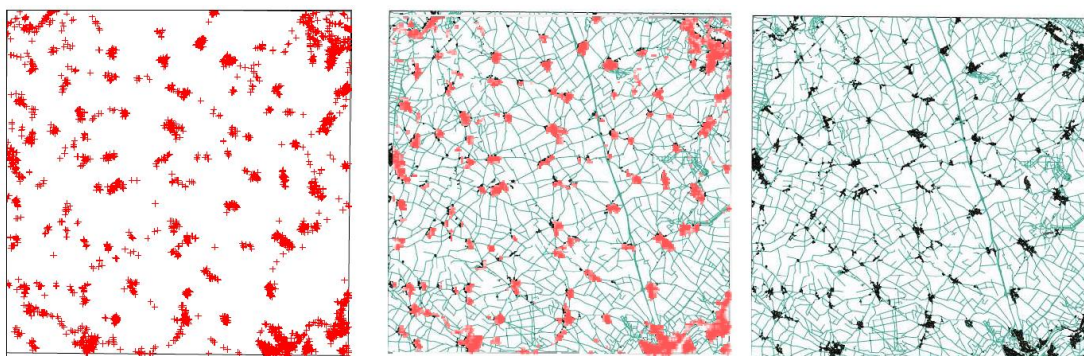


En haut : pins, cèdres et douglas dans la zone d'échantillonnage de la Vallée de Germigny (15 x 15 km) incluant la ville de Sancoins dans sa partie sud-est (en gris zones forestières inventoriées par l'IFN ; en bleu clair, limites des territoires inventoriés) ; en bas : proportion des différentes essences recensées

Action 4 : analyse paysagère des données d'inventaire en milieux ouverts (INRA URZF, INRA CBGP)

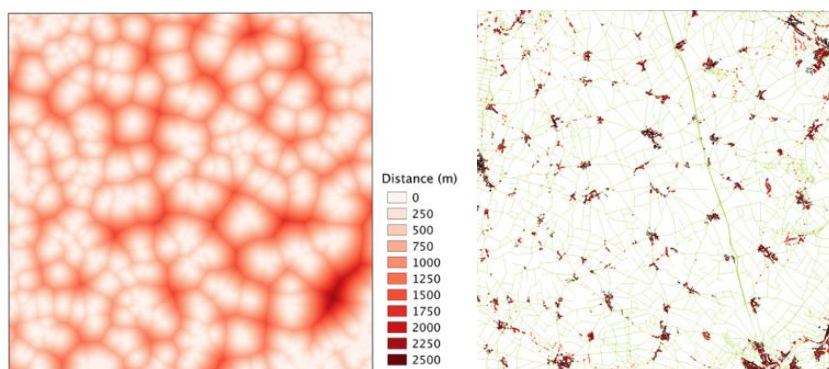
Ces analyses ont été conduites sur le jeu de données conifères pour lequel il a pu être mis rapidement en évidence une relation entre leur distribution spatiale et des co-variables disponibles dans des bases de données cartographiques.

La distance au plus proche bâti s'est avérée suffisante pour décrire correctement la distribution des AHF au sein de la parcelle d'étude (figure ci-dessous, voir Rossi *et al.*, 2015 pour plus de détails).



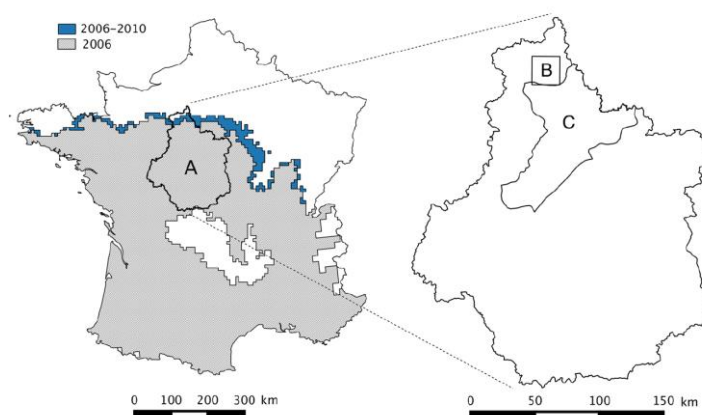
A gauche, distribution des AHF recensés dans la parcelle d'étude ; à droite, distribution du bâti et des routes dans la BD TOPO de l'IGN ; au centre, superposition des couches AHF, bâti et routes

Les simulations réalisées avec le modèle statistique construit (modèle de processus ponctuels) distribuent les arbres aléatoirement mais avec une contrainte sur la densité qui est liée à l'endroit où on simule (effet bâti ; la densité est contrainte par une co-variable « distance au plus proche bâti »).



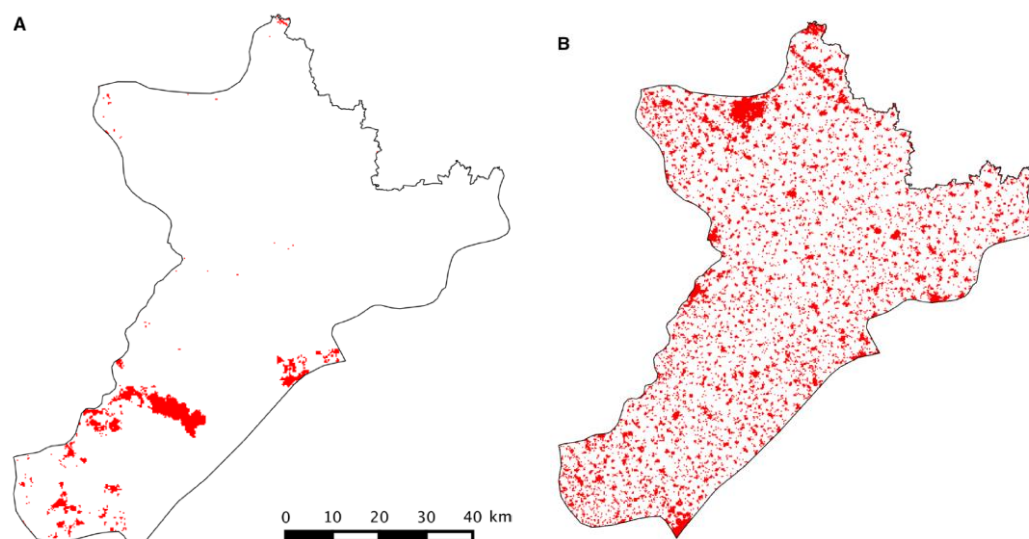
A gauche, carte de la distance au plus proche bâti pour la parcelle d'étude, à droite AHF simulés (en rouge) sur fond BD TOPO avec bâti et routes

A partir du modèle construit sur la parcelle d'étude du Thymerais, il est possible de simuler les AHF dans l'éco-paysage voisin et similaire de la Beauce (voir Rossi *et al.*, 2015).



Localisation par rapport à la Région Centre Val de Loire (A) et au front de colonisation de la processionnaire du pin (en bleu) de la parcelle d'étude où les AHF ont été inventoriés (B) et de l'éco-paysage où ils ont été simulés (C)

Les résultats des simulations montrent que la Beauce est loin d'être le désert en essences forestières que l'on pouvait attendre. Alors que les parcelles forestières contenant ces conifères sont effectivement rares, ces arbres sous forme d'AHF couvrent tout le territoire via un maillage de villes, villages et hameaux « irriguant » ce milieu non forestier en arbres. Il est donc possible de comprendre pour la première fois pourquoi la Beauce n'a pas constitué une barrière à l'expansion vers le nord.



A gauche, conifères recensés en Beauce par l'IFN ; à droite, AHF simulés par le modèle construit à partir de l'inventaire du Thymerais

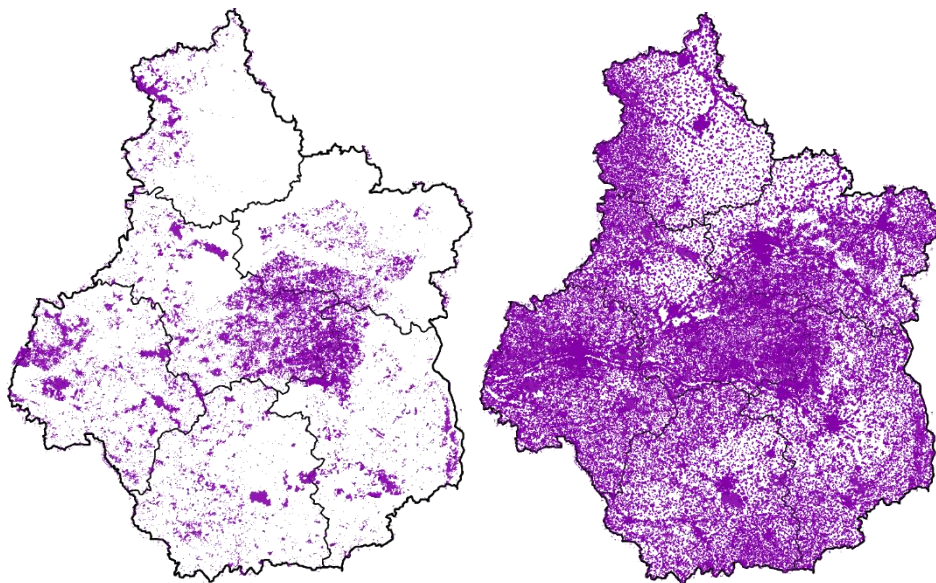
La connectivité spatiale de la Beauce est beaucoup plus forte qu'attendue (voir tableau ci-dessous et Rossi *et al.*, 2015)

Table 1 Landscape characteristics for PPM host tree species

	Percentage of landscape (%)	Patch density (number of patches per 100 ha)	Edge density (m per ha)
Observed HTOF	12.41	0.326	10.715
Simulated HTOF	16.785 (7.95e-05)	0.462 (0.0006)	13.32 (0.798)
IFN	1.477	0.041	1.196
IFN + observed HTOF	13.622	0.322	11.273

Observed HTOF refers to observed host species in the field. Simulated HTOF refers to 1000 host tree distributions simulated in the inventory plot. IFN denotes the inventory data available from the IFN database. IFN + HTOF represents the sum of the traditional inventory data plus a component standing for the HTOF contribution to landscape structure. Standard errors are given in parentheses

Le modèle appliqué à l'échelle de la Région montre là aussi que la connectivité spatiale est beaucoup plus forte qu'attendue. Mais la simulation présentée ci-dessous n'a qu'un caractère indicatif, car le modèle construit à partir d'une zone d'open-fields a été appliqué à l'ensemble de la région quel que soit le milieu. Les données issues de l'action 3, et d'éventuels autres échantillonnages en cas de succès à d'autres APR, permettront de construire un modèle plus approprié à cette échelle et à la diversité des éco-paysages.



A gauche, parcelles de conifères (>2,25 ha) inventoriées par l'IFN en Région Centre Val de Loire ; à droite, AHF simulés avec le modèle « open-fields ».

Tâche 3 «identification moléculaire des mélèzes et peupliers»

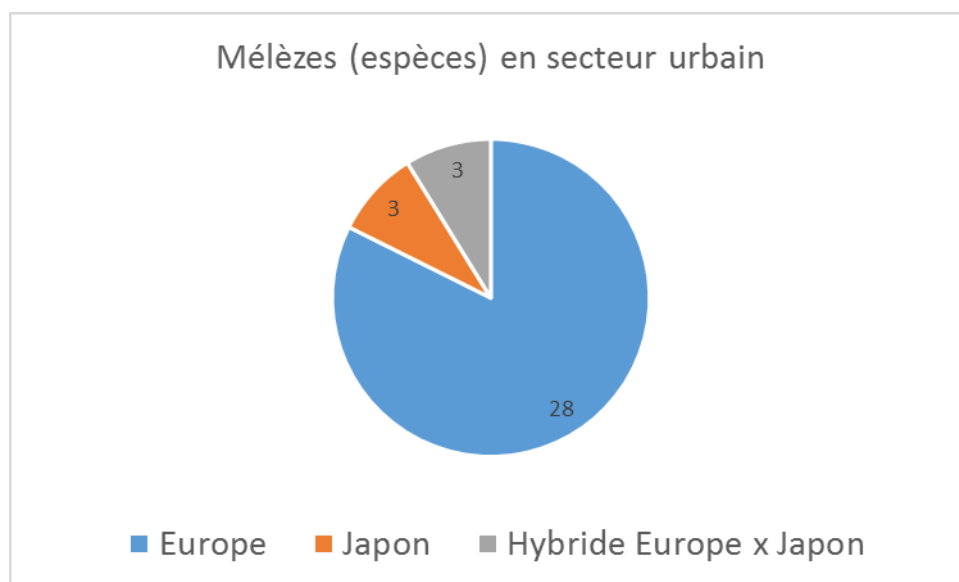
⇒ L'objectif de cette tâche était de décrire la variabilité des peupliers et mélèzes dispersés avec plus de précision que ce que permettait l'observation botanique de terrain. Cette description fine permet d'accéder à la diversité génétique de la matrice Arbres – surtout s'agissant d'une espèce comme le peuplier, diffusée essentiellement par bouturage – mais aussi à sa diversité fonctionnelle vis-à-vis de la problématique « rouille », chaque variété ayant ses singularités pour ce qui est de la sensibilité au champignon.

L'INRA et l'ONF disposent de techniques de marquage moléculaire permettant d'identifier les variétés de peupliers et de distinguer le mélèze d'Europe du mélèze du Japon et de leurs hybrides. Pour des raisons de distance et de volume d'étude, cette Tâche a porté exclusivement sur l'inventaire urbain (Tâche 1).

Action 1 : récolte d'échantillons et identification des mélèzes au niveau spécifique (ONF)

Deux marqueurs moléculaires ont été mis en œuvre. Le marqueur *f13* est un marqueur mitochondrial dont la présence atteste de l'appartenance à l'espèce *Larix kampeferi* (Japon). Le marqueur *II(rcbL)* est un marqueur chloroplastique dont la taille dépend de l'espèce. La combinaison de ces deux marqueurs permet de distinguer mélèze d'Europe et mélèze du Japon mais également d'identifier les hybrides de première génération entre ces deux espèces.

Parmi les 50 mélèzes inventoriés dans la Tâche 1, 35 ont pu faire l'objet de récoltes d'aiguilles. Leur analyse a révélé que la grande majorité appartient à l'espèce mélèze d'Europe, que trois d'entre eux sont de l'espèce japonaise *L. kaempferi* tandis que trois autres sont des hybrides de première génération entre ces deux espèces.

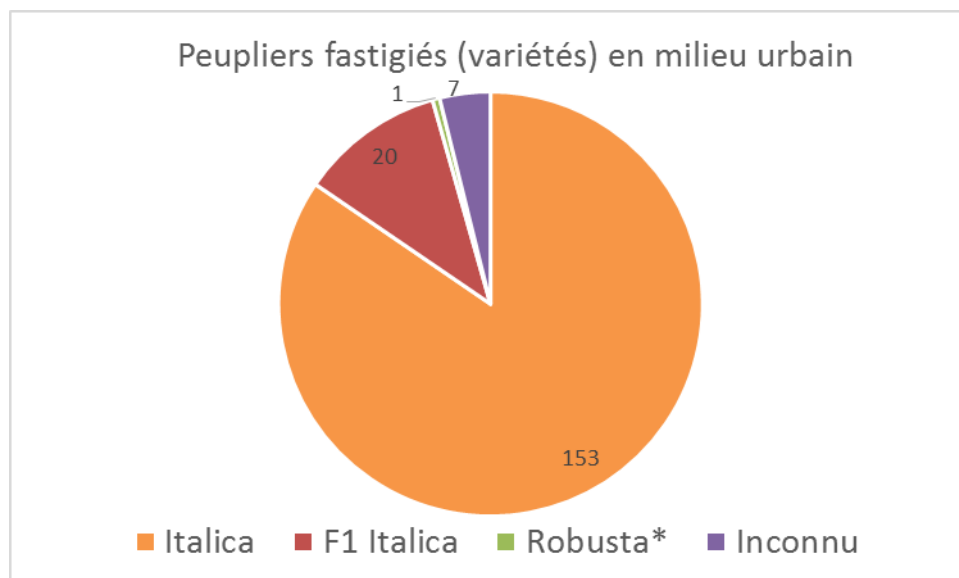


Identification spécifique par marquage moléculaire des mélèzes échantillonnés en milieu urbain

Action 2 : récolte d'échantillons et identification des cultivars de peupliers non caractérisés botaniquement (INRA AGPF)

Cette action devait initialement porter sur les peupliers dont l'assignation à une variété n'avait pas été possible lors du relevé de terrain. Cependant, la reconnaissance visuelle des variétés de peupliers

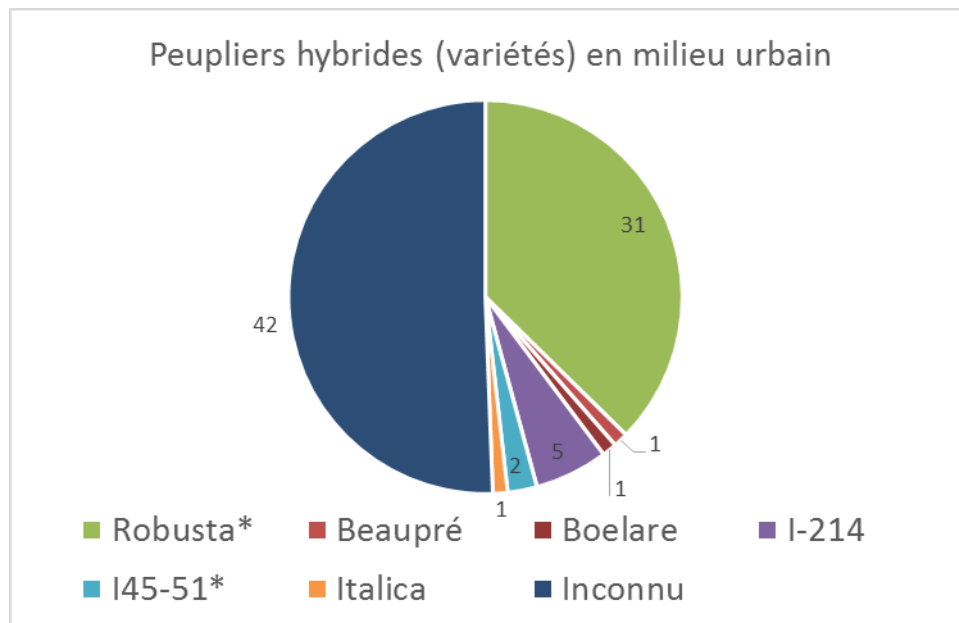
Concernant les peupliers noirs fastigiés, et comme attendu, plus des trois quarts des individus génotypés sont des clones de la variété 'Italica'. La plupart des individus restants partagent un allèle avec 'Italica' à chacun des marqueurs, laissant supposer qu'ils sont issus de croisements entre 'Italica' et un autre peuplier (noir sauvage ou hybride). La fréquence d'Italica dans nos paysages (cette étude en apporte la confirmation) explique aisément que de tels croisements soient fréquents.



Identification variétale par marquage moléculaire des peupliers noirs fastigiés échantillonnés en milieu urbain (* indique une variété commerciale descendant d'Italica)

Concernant les peupliers hybrides, cette étude apporte des éclairages très intéressants :

- La moitié des individus analysés n'a pu être assignée à aucune variété et présente une très grande diversité. Cela peut résulter d'erreurs d'analyse ou de lacunes dans notre panel de référence, mais nous faisons l'hypothèse qu'il s'agit plus vraisemblablement de mauvaises assignations à la catégorie « peuplier hybride » au cours de l'inventaire de terrain. En effet, il peut être difficile de distinguer un peuplier noir d'un peuplier hybride de type euraméricain (moitié de sang peuplier noir). Plus précisément, les inventaristes ont pu se laisser influencer par le contexte et assigner plus aisément à la catégorie « peuplier hybride » que « peuplier noir » à mesure qu'ils s'éloignaient de la Loire. Cette hypothèse, si elle se confirmait, permettrait de considérer le milieu urbain comme zone de conservation de cette espèce menacée dans son habitat naturel.
- Plus du tiers des individus analysés sont des clones de la variété 'Robusta'. Il s'agit d'une variété relativement ancienne (> 100 ans) de peuplier de type euraméricain (*P. deltoides* x *P. nigra*) qui a été très utilisée en populiculture dans les années 1950. Il est intéressant de noter (et notre étude a ainsi confirmé des écrits anciens) que cette variété a pour père 'Italica'. I45-51 est également un descendant d'Italica et a été identifié deux fois. La diversité génétique du paysage peuplier urbain apparaît donc comme incroyablement faible au regard des multiples variétés existantes. Les quelques variétés identifiées et non issues d'Italica – en l'occurrence Beaupré, Boelare et I-214 – sont des variétés de production bien connues des populteurs.



Identification variétale par marquage moléculaire des peupliers de type « hybride intersécifique » échantillonnés en milieu urbain (* indique une variété commerciale descendant d'Italica)

Concernant les autres catégories analysées :

- Parmi les 11 *P. alba* étudiés, tous sont différents
- parmi les 16 *P. nigra* non fastigiés, tous sont différents et l'un d'eux est – à nouveau - un descendant potentiel d'Italica, confirmant le fait que les descendants d'Italica n'héritent pas tous de son port fastigié.
- parmi les 19 grisards, 2 clones représentés chacun par deux individus ont été identifiés. Tous les autres individus sont distincts les uns des autres.

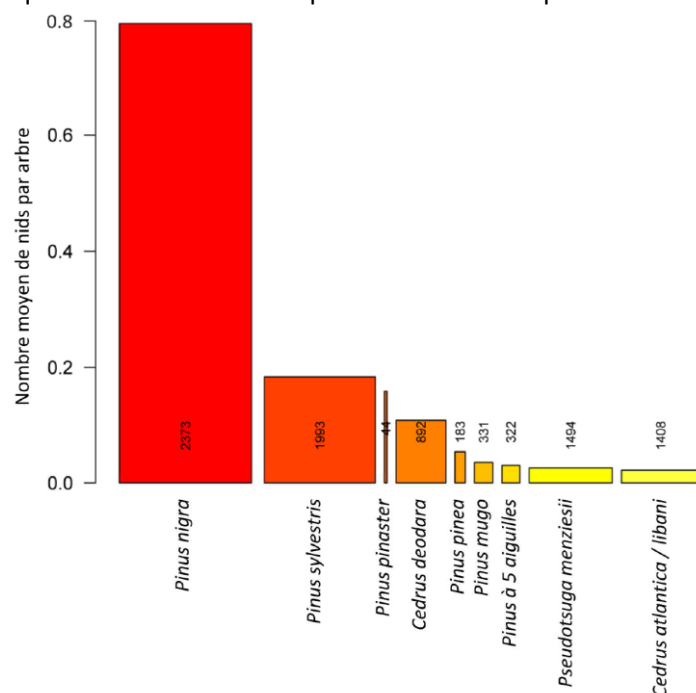
Tâche 4 «processionnaire du pin»

⇒ L'objectif de cette tâche était de savoir si les AHF inventoriés dans les Tâches 1 et 2 sont à l'origine de continuités écologiques fonctionnelles pour la processionnaire du pin.

Action 1 : localisation exhaustive des nids en ville et analyse paysagère (INRA URZF)

Les nids de processionnaire du pin en ville ont été recensés conjointement à leurs arbres-hôtes (voir tâche 1, action 1). Pour chaque arbre inventorié, il a été noté si le dénombrement des nids était exhaustif (arbre observable dans sa totalité), partiel ou impossible puis le nombre de nids a été compté exhaustivement de 0 à 20, et noté "21 et +" au-delà. Deux types d'approche ont été conduites sur ces données : des analyses géostatistiques et des analyse de voisinage (pour plus de détails, voir Rousselet *et al.*, 2015 ; Rossi *et al.*, soumis). Les résultats présentés ici ne correspondent qu'aux toutes premières étapes de l'exploration de ce jeu de données.

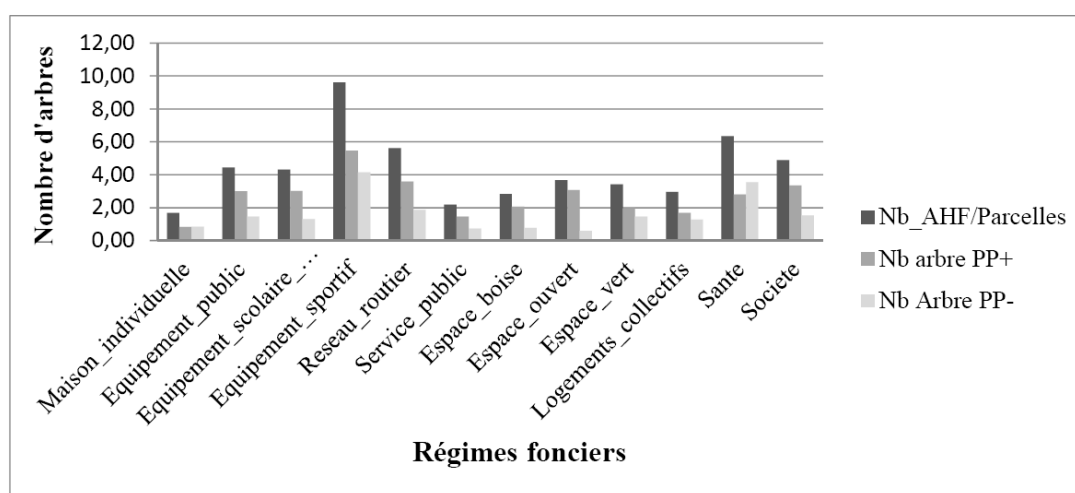
Comme indiqué dans la tâche 1, le niveau d'attaques varie considérablement selon les essences (figure ci-dessous). Les essences les plus plantées sont également les plus attaquées. La figure ci-dessous fournit un classement des arbres-hôtes en fonction de leur niveau d'infestation qui peut servir de base objective (quantifiée et établie sur un grand nombre d'observations) pour les communes qui souhaiteraient modifier leur PLU en vue d'interdire ou de déconseiller certaines essences pour limiter les nuisances et les risques sanitaires liées à la processionnaire du pin.



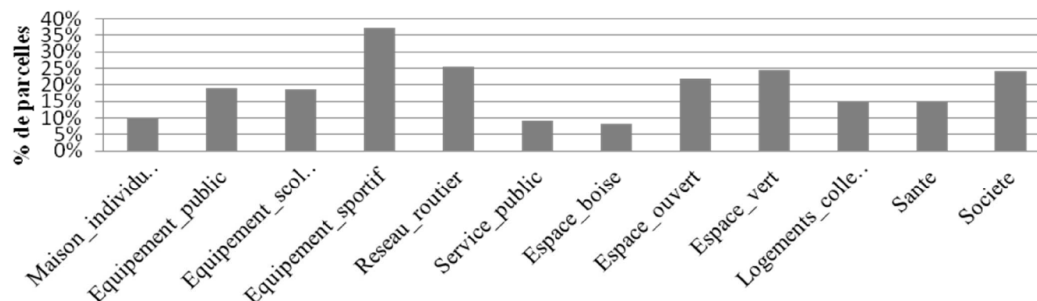
Niveaux d'infestation des différentes essences par la processionnaire du pin sur l'ensemble des cinq communes inventoriées durant l'hiver 2012-2013 (Orléans, Saint-Jean-de-Braye, Semoy, Fleury-les-Aubrais et Saran). La largeur des barres est proportionnelle au nombre d'arbres inventoriés (chiffres en noir) et la hauteur des barres au nombre de nids dénombrés en moyenne par arbre (en ne tenant compte que des arbres pour lesquels le dénombrement des nids a pu être exhaustif)

Vu leur poids numérique parmi les parcelles hébergeant des AHF, les jardins de maisons individuelles sont la catégorie qui héberge le plus d'arbres hôtes de la processionnaire du pin, et

numériquement le plus d'arbres hôtes très favorables (c'est-à-dire des pins noirs, sylvestres, maritimes ou des cèdres de l'Himalaya) (voir tâche 1). Par contre, si l'on considère la proportion arbres hôtes très favorables / arbres hôtes moins favorables, c'est la catégorie qui a les pratiques les moins propices à l'insecte, et c'est l'une des catégories les moins attaquées (figures ci-dessous et Chauveau A., 2015). Les particuliers semblent notamment planter plus couramment des essences moins habituelles et semblent plus diversifier les essences qu'ils plantent (ce qui pourrait résulter par exemple d'une volonté de personnaliser son lieu de vie, même si des aspects de disponibilité sur le marché et de prix sont probablement propices à la plantation d'un petit nombre d'essences).



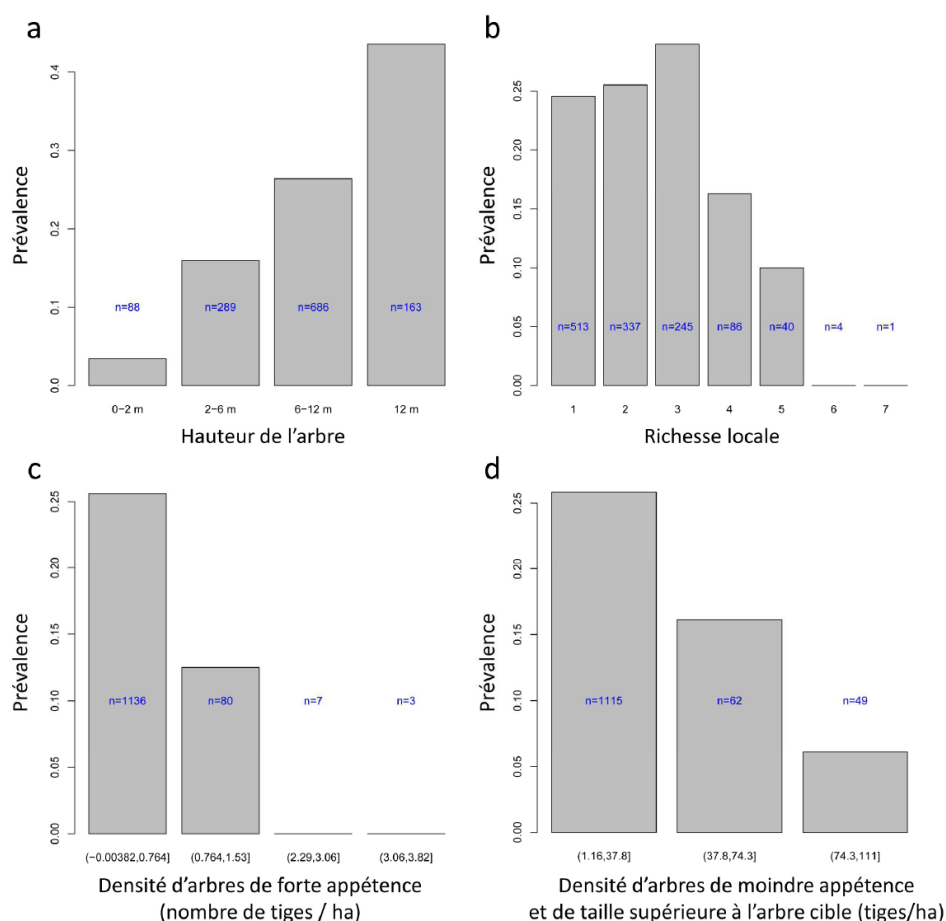
Moyennes des nombres d'arbres totaux, des nombres d'arbres les plus favorables parmi les arbres potentiellement hôtes (PP+), des nombres d'arbres les moins favorables (PP-) par parcelle selon les différents types de terrain.



Pourcentage de parcelles attaquées selon les types de terrain.

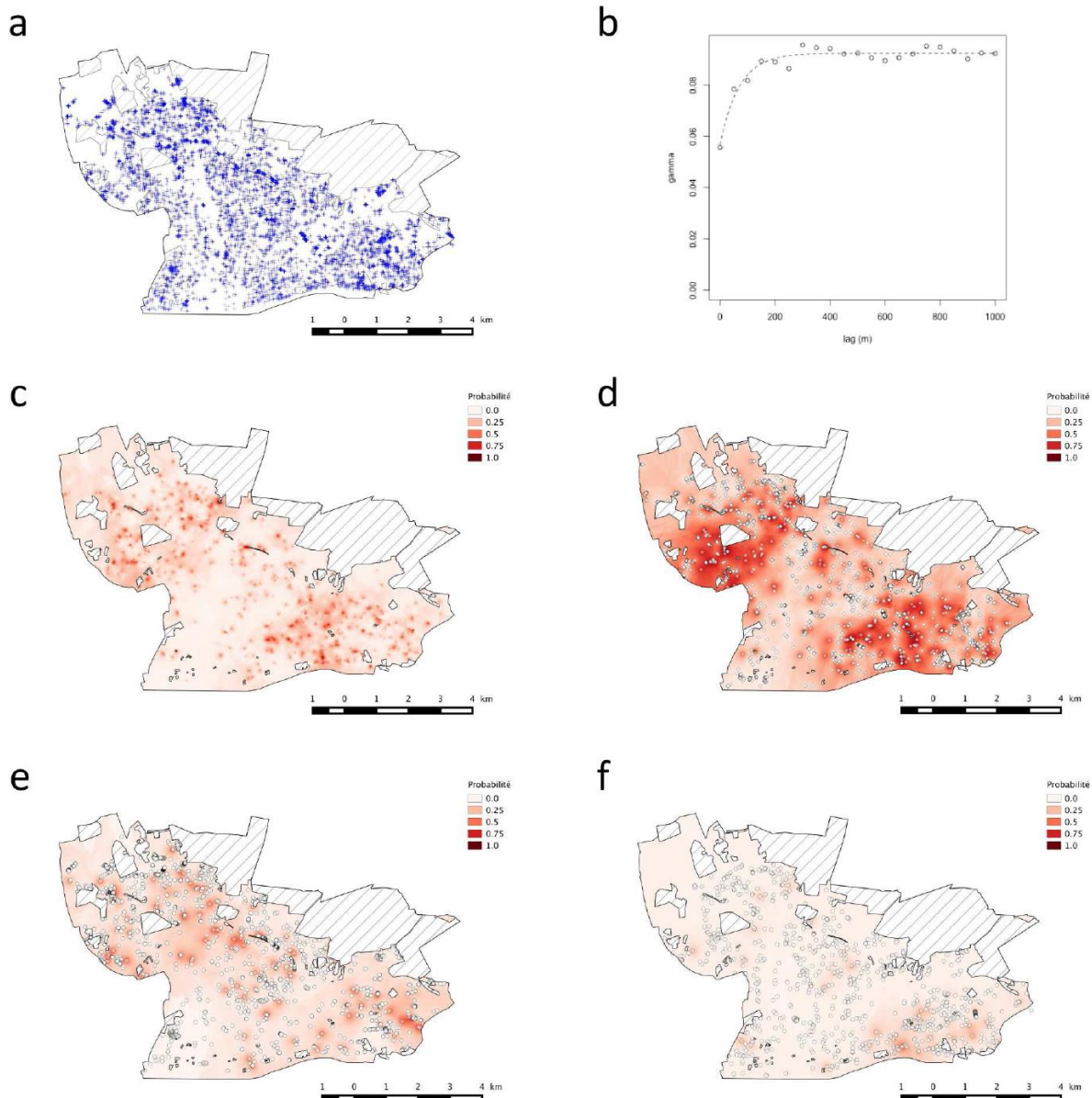
Les résultats préliminaires d'analyse de voisinage, portant sur l'étude de l'influence du contexte paysager local sur les niveaux d'attaque des arbres, pourraient indiquer que la richesse locale en AHF hôtes ait un effet protecteur (voir cadre b, figure ci-dessous, et Rousselet et al, 2015). Mais du fait de nombreux facteurs confondants, les analyses menées jusqu'ici n'ont qu'un caractère exploratoire et ne permettent pas de tirer de conclusion. Néanmoins, elles encouragent fortement à poursuivre les investigations dans cette voie.

Il serait intéressant également de géo-localiser l'ensemble des arbres non-hôtes de l'agglomération en repérant les houppiers sur des orthophotos de l'IGN. Tous les houppiers ne correspondant pas à des points de notre inventaire pourraient être attribués à des essences non hôtes. Même si de cette façon l'essence ne serait pas identifiée, il serait possible d'introduire dans nos analyses de voisinage des variables du type « proportion d'arbres hôtes et non hôtes » dans divers rayons autour de l'arbre ciblé dont le niveau d'infestation est connu.



Prévalence des attaques de processionnaire sur pin noir (a) en fonction de la hauteur de l'arbre cible (b) en fonction de la richesse spécifique avoisinante (rayon de 50m), (c) en fonction de la densité d'arbres appartenant à des essences à fort potentiel d'infestation, (d) en fonction de la densité d'arbres appartenant à des essences à faible potentiel d'infestation mais de taille supérieure à celle de l'arbre cible.

A l'échelle de la ville, les niveaux d'infestation par la processionnaire présentent une forte structure spatiale (figure ci-dessous). Sur la base des inventaires réalisés, il serait intéressant de définir des placettes suivies annuellement pour voir si les patrons spatiaux d'infestation se maintiennent ou changent au cours des années. S'ils se maintiennent, il faudrait alors rechercher les liens qui pourraient exister avec la structure de la ville et le contexte paysager local (ou les actions de lutte et de communication engagées).



Distribution des arbres-hôtes potentiels de la processionnaire du pin et structure spatiale des infestations (a) localisation des arbres inventoriés (croix bleues) et des zones non inventoriées (hachures grises) (b) variogramme présence / absence de nids de processionnaire du pin en considérant l'ensemble des arbres hôtes inventoriés (c) cartographie de la probabilité d'observer au moins un nid sur un arbre toutes espèces confondues (d) cartographie de la probabilité d'observer au moins un nid sur *Pinus nigra* (e) sur *Pinus sylvestris* (f) sur *Cedrus deodara* correspondant à trois des essences les plus abondantes et les plus attaquées

Les collectivités territoriales n'hébergent sur leur territoire et ne gèrent finalement qu'une petite partie des AHF potentiellement hôtes de la processionnaire du pin (voir aussi tâche 1, et Chauveau, 2015). Pour réduire le niveau de nuisance à l'échelle d'une agglomération, il serait notamment intéressant d'évaluer l'intérêt d'une stratégie consistant à décourager la plantation d'essences très favorables comme le pin noir au profit d'essences moins favorables comme le pin pignon grâce à une meilleure connaissance des motivations des différentes catégories de « planteurs », tout en maintenant la plantation d'arbres très attractifs en quelques endroits du domaine public où les risques en matière de santé publique sont très faibles (certains accompagnements de voirie comme des ronds-points ou par exemple) de façon à concentrer et planifier la lutte et à éviter que l'insecte ne finisse par s'adapter à un nouveau contexte. Remplacer la mode du pin noir par une autre n'est probablement

pas la meilleure stratégie, même s'il s'agit d'une essence peu favorable (comme cela semble se dessiner avec le pin pignon actuellement d'après nos résultats d'inventaire indiquant une augmentation de cette essence dans les plantations récentes et d'après sa disponibilité croissante dans la grande distribution). Encourager les acteurs du domaine privé (particuliers, sociétés, ...) à planter encore moins essences très favorables revêt probablement un intérêt particulier à l'interface ville/campagne, où il semble constituer la catégorie la plus importante (pavillons et zones commerciales en périphérie de ville, néoruraux modifiant les essences disponibles et donc les continuités le long d'un gradient ville-campagne).

Action 2 : localisation de nids dans des éco-paysages non forestiers et analyse paysagère (INRA URZF)

Sur la base des premiers essais d'inventaire, il a été décidé lors du copil du 04/12/2012 d'abandonner la réalisation de cette action qui aurait mobilisé des moyens trop importants au détriment des autres approches. En outre, l'effort d'échantillonnage qui aurait pu être produit n'aurait pas garanti que les résultats soient exploitables.

Alternativement, en utilisant notamment les données de l'action 3 (individus géo-référencés collectés tous les 16 km pour la génétique), nous avons testé la fiabilité d'une méthode de recensement et de cartographie de la processionnaire du pin à l'échelle régionale via Google Street View. Celle-ci s'est avérée utilisable mais pas à toutes les échelles spatiales. Cette méthode ne peut pas remplacer les prospections de terrain mais elle peut constituer une source complémentaire de données très intéressante et économique.

Après avoir fait l'objet d'un communiqué de presse INRA, repris par un communiqué AFP, puis par un journaliste indépendant américain, la parution de l'article dans PLOS ONE correspondant à ce travail a connu un fort retentissement avec une importante couverture médiatique en France et à l'étranger, notamment dans la presse numérique.

Cet article est disponible en Open Access (<https://www.researchgate.net/publication/257839693>) et a fait également l'objet d'un article dans la revue Covalences (<http://www.centre-sciences.org/uploads/Cov90web.pdf>).

Action 3 : génétique du paysage : géotypage de chenilles collectées selon une grille couvrant l'ensemble de la région (INRA URZF, INRA CBGP)

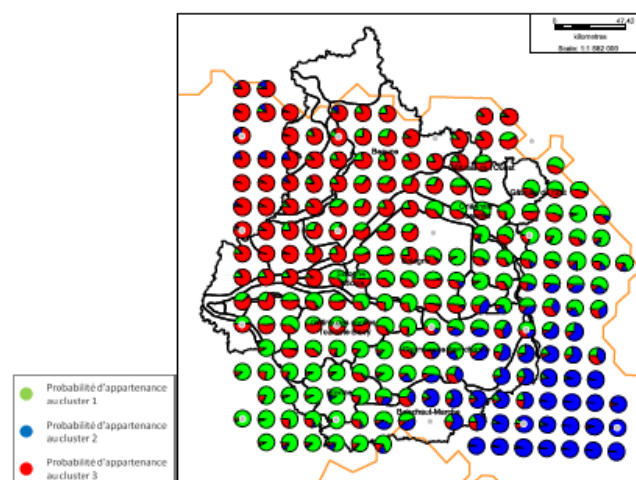
Le modèle de distribution des AHF réalisé dans le cadre de la tâche 2 a permis de mettre en évidence, en Beauce et globalement en région Centre Val de Loire, une connectivité spatiale bien plus élevée qu'attendue. Ces résultats supportent l'hypothèse émise suite aux observations du CEMAGREF dans les années 1990-2000 sur la colonisation de la Région par la processionnaire du pin, à savoir une progression plus rapide en milieu non forestier chez cette espèce forestière. Il est à noter également que la 3^{ème} campagne de cartographie de la processionnaire du pin à l'échelle nationale actuellement en cours (projet financé par la DGAL du Ministère de l'Agriculture) montre que l'avancée du front de colonisation entre les hivers 2010-2011 et 2015-2016 a été la plus rapide en Champagne, c'est-à-dire dans une région présentant des similitudes avec la Beauce. L'objectif de cette action est de montrer que les connectivités spatiales mises en évidence dans la tâche 2 correspondent à des connectivités fonctionnelles pour cette espèce.

Les mouvements d'individus à vaste échelle n'étant pas directement observables sur le terrain chez la processionnaire du pin, nous avons opté pour une approche dite de « génétique du paysage ». Il s'agit d'identifier s'il existe des corridors de migration ou bien des filtres ou des barrières à la dispersion qui, en affectant les flux d'individus, affectent les flux de gènes dont ils sont porteurs. Les éléments du paysage modulant la dispersion sont donc attendus pour laisser une empreinte perceptible sur la structure génétique des populations. Cette approche a fait l'objet d'un stage de master 2 en 2012-

2013 (master sciences biologie, spécialité BOPE ; Simon Laubray, 2nd de sa promotion pour la note de stage). Une partie des indemnités de stage a été couverte en réallouant 930,24 EUR du budget fonctionnement vers le budget personnel et le reste a été pris sur la dotation d'état de l'URZF (voir CR du copil du 04/12/2012). Il est à noter que ce travail a été rendu possible par le renouvellement dans le cadre d'un projet d'initiative académique (APR 2011) du séquenceur à capillaire dont l'utilisation est mutualisée entre INRA - AGPF, INRA - URZF, ONF – CAGF, et Université d'Orléans - LBLGC (le coût de l'externalisation du génotypage n'aurait pas permis d'intégrer ce volet du travail dans ce projet).

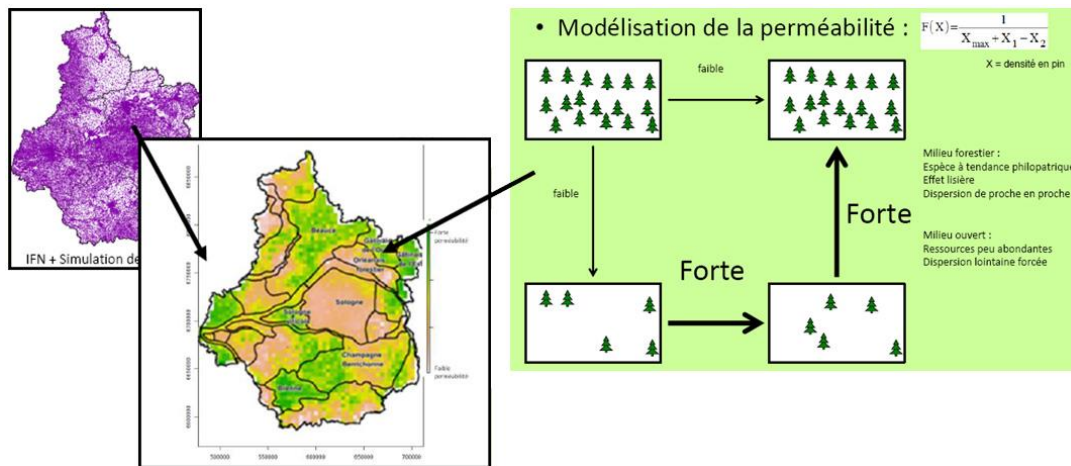
L'objectif de l'approche de génétique du paysage menée au cours de ce projet est de rechercher les corrélations entre une matrice de distances génétique (calculées entre chaque paire d'individus) et différentes matrices de distance géographiques et paysagères (séparant ces individus).

Au total, environ 1500 individus ont été collectés et génotypés, à raison de 5 à 15 chenilles par quadrat de 16 x 16 km sur un territoire d'une superficie de 60 000 km² centré sur la région centre Val de Loire. Sur ces 1500 individus, 1026 ne présentant pas plus de 20% de données manquantes ont été conservés pour les analyses. Sur les 19 marqueurs microsatellites utilisés pour le génotypage, les données de 11 d'entre eux se sont avérées exploitables (données de bonne qualité ne laissant pas de doute sur la fiabilité du marqueur). Les résultats obtenus ont montré de façon connexe que les populations de la zone d'étude n'étaient pas uniquement composées des deux lignées maternelles connues pour être en expansion sous l'effet du réchauffement climatique mais aussi d'une lignée transportée par l'être humain et introduite dans le nord-ouest de la grille (voir Rousselet et al, 2015). Ces résultats inattendus nous ont obligé à doubler l'utilisation des marqueurs microsatellites nucléaires (à hérédité biparentale) par du séquençage d'un fragment d'ADN mitochondrial (à hérédité maternelle) sur une partie importante des individus afin de localiser la distribution des lignées dans la zone d'étude.



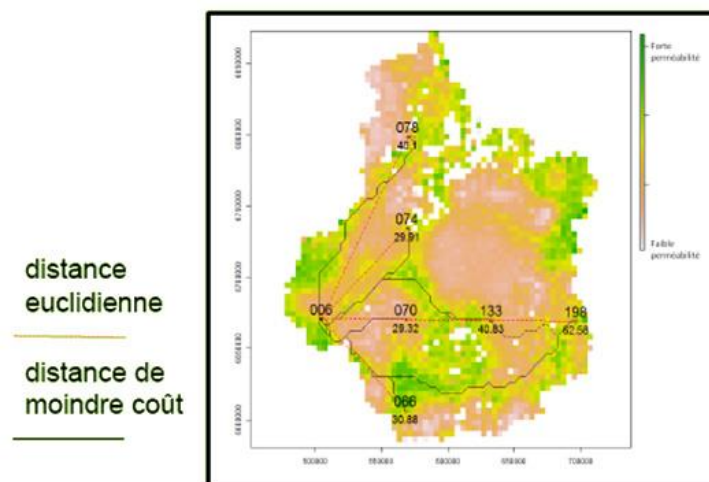
Distribution des trois clusters d'individus déterminés à l'aide du logiciel Structure à partir des données microsatellites : les diagrammes circulaires représentent la probabilité des individus du quadrat d'appartenir aux trois clusters (rouge, vert, bleu) dont le nombre a ici été défini sur la base des données mitochondriales.

A partir d'une modélisation de la perméabilité du milieu pour l'insecte mimant son comportement en fonction de l'hypothèse formulée (milieux forestiers denses = freins ; milieux ouverts = corridors) et de la distribution des arbres hôtes de la processionnaire du pin (AHF simulés dans le cadre de la tâche 2, action 4 + parcelles inventoriées par l'IFN), on peut déterminer, les zones de faible et de forte perméabilité pour l'insecte à l'échelle de la Région (figure ci-dessous).



Modélisation de la perméabilité : en haut à gauche, distribution des arbres hôtes de la processionnaire du pin en Région Centre (AHF simulés + IFN°des AHF simulés ; en haut à droite, modèle de perméabilité du milieu ; en bas au centre, distribution des zones de faible (marron) et de forte (vert) perméabilité.

Il est alors possible de calculer différentes sortes de distance entre deux points de la zone d'étude, dont par exemple la distance euclidienne (distance « à vol d'oiseau ») ou la distance de moindre coût (trajectoire qui passe par les zones les plus perméables et non en ligne droite, voir figure ci-dessous).



Exemple de trajectoires de calcul de distances : pour aller d'un point à un autre certaines trajectoires sont plus longues mais moins coûteuse que la ligne droite.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de mettre en évidence des corrélations significatives entre les probabilités d'appartenir à un cluster et les distances paysagères basées sur notre hypothèse de perméabilité, mais seulement pour les deux lignées introgressant au nord de la zone d'étude (voir Laubray 2013 pour plus de détails). Cela indique que le niveau d'introgression entre la lignée « rouge » et la lignée « verte » est influencée par la perméabilité du milieu, et donc par le paysage (contrairement à celle entre la lignée verte et la lignée bleue qui est très réduite, sans lien détectable avec le paysage). Ce résultat semble donc confirmer que les connectivités spatiales mises en évidence sont des connectivités fonctionnelles, et que le paysage peut moduler la dispersion de cette espèce.

Conclusion générale pour le modèle processionnaire du pin et ses arbres-hôtes (tâche 1, 2 et 3)

Les arbres ornementaux présents dans les zones bâties, sont présents à des densités faibles en comparaison avec les massifs forestiers, mais, au regard des capacités de vol de l'insecte (Robinet et al, 2012, *Biological Invasions*), ils sont présents à une densité suffisante pour être à l'origine de continuités fonctionnelles assurant la circulation de l'insecte aussi bien en milieu urbain que rural. Ceci est corroboré par l'analyse des flux de gènes à l'échelle régionale. Les propriétaires de maisons individuelles n'apparaissent pas être la catégorie d'acteurs qui a les pratiques les plus favorables à la processionnaire (en matière de choix d'essences), mais vu leur poids numérique, ils constituent néanmoins la catégorie qui contribue le plus fortement à la disponibilité en arbres-hôtes en dehors des milieux forestiers. Il apparaît donc maintenant important d'identifier les facteurs économiques et culturels influençant les choix d'essences afin de définir des leviers d'action permettant de réduire les continuités écologiques favorables à la processionnaire et de limiter son niveau d'abondance à un seuil acceptable de nuisance. Il s'agit de concevoir les infrastructures vertes de façon à en obtenir à l'avenir un service, et non un « disservice » comme cela a été le cas ces dernières décennies.

Tâche 5 «puceron lanigère du peuplier» (Université d'Orléans)

⇒ Les actions 1 et 2 visaient à prospecter et échantillonner des populations de puceron lanigère du peuplier *Phloeomyzus passerinii* aussi bien en secteur urbain du nord de l'agglomération Orléanaise que dans des peupleraies de la région Centre-Val de Loire et d'autres régions de référence. Ensuite, les individus prélevés devaient être analysés génétiquement avec des marqueurs moléculaires microsatellites afin de rechercher l'origine des populations régionales et de quantifier la diversité génétique et la distribution spatiale de celle-ci à plusieurs échelles.

La mise en place d'un maillage (1 km x 1 km) en milieu urbain au nord de l'agglomération Orléanaise a permis de prospecter en 2012 une partie des peupliers sur la base de la carte de distribution des arbres fournie par l'INRA. Nous avons rencontré des difficultés pour observer les peupliers plantés dans des propriétés privées. En effet, se développant principalement dans les crevasses de l'écorce, les colonies de ce puceron sont cryptiques et peuvent être visibles à quelques mètres seulement lorsque le nombre d'individus est suffisant pour que la colonie recouvre de son feutrage blanc caractéristique une partie du tronc. Trois communes (Saint-Jean-de-Bray, Saint-Ay et Chaingy) ont pu être prospectées plus facilement, mais aucun signe d'infestation n'a été détecté. Cet insecte étant connu pour s'attaquer à des peupliers cultivés en zone rurale, nous avons alors prospecté en 2013 des peupleraies à l'Est de l'agglomération (Courcy-aux-Loges, Ingrannes, Vitry-aux-Loges, Chateaufort-sur-Loire, St-Martin-d'Abbat) et à l'Ouest (Saint-Ay, Meung-sur-Loire, Cléry-Saint-André, Mareau-aux-Prés), mais aucune colonie n'a été observée. Nous avons ainsi concentré notre recherche sur les peupleraies cultivées qui sont une source potentielle d'infestation vers des arbres en milieu urbain. Les cartes ci-dessous rapportent l'état d'infestation du puceron lanigère dans les peupleraies de France (Figure 1a) et dans la région Centre-Val de Loire (Figure 1b).

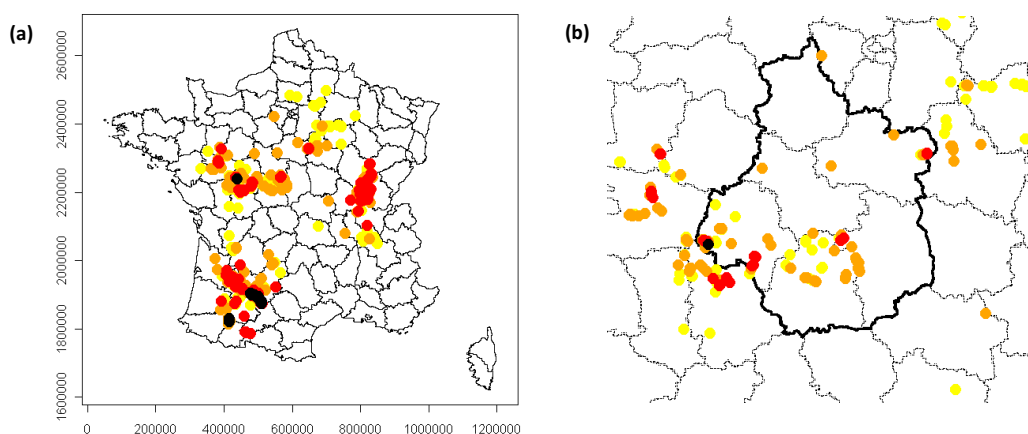


Figure 1. Localisation des signalements de puceron lanigère du peuplier entre 1996 et 2014 (a) en France et (b) en région Centre-Val de Loire (noir : 1996-1998, rouge : 1999-2006, orange : 2007-2009, jaune : 2010-2014). Cartes réalisées d'après les données fournies par le DSF.

Les départements d'Indre-et-Loire et de l'Indre ont été les plus attaqués, particulièrement ces dernières années, tandis que les peupleraies du Loiret ne sont que très peu touchées, ce qui peut expliquer en partie que nous n'ayons pas pu observer de puceron au début de notre étude dans ce département. La Figure 1a montre que certaines régions sont plus touchées que d'autres, et que le signalement de puceron y est parfois très récent, notamment en Champagne-Ardenne et Picardie. L'analyse génétique à 12 loci microsatellites d'un échantillonnage de pucerons issus de 32 localités françaises réparties sur plusieurs régions françaises nous a permis d'identifier 77 génotypes multi-loci (ou 'MLG' pour 'Multilocus genotype' ou clone) dont 26 présents en Centre-Val de Loire (Pointeau et

(a) Map of France showing sampling locations (Eco, GerA, GerB, GerC, Riv, Cra, Cin2B, Eoa, ThiB, Bre, RocB, StjB, StjA, StgB, StgA, Lig, Abi, Nue) and pie charts representing the MLVA profile distribution for each strain. The pie charts are color-coded according to the legend in (b). The map includes labels for regions: MAINE-ET LOIRE, DEUX-SEVRES, VIENNE, and INDRE-ET LOIRE. A scale bar indicates 0 to 40 km.

(b) Pie chart showing the distribution of MLVA profiles across all 15 strains. The legend indicates the following profile percentages: Mlg68 (40%), Mlg11 (25%), Mlg22 (19%), Mlg66 (8%), Mlg26 (2%), Mlg76 (1%), Mlg15 (1%), Mlg81 (1%), Mlg6 (1%), and Mlg7 (1%).

Sur les 150 individus génotypés aux 12 loci microsatellites, nous avons identifié 10 clones. L'indice de diversité génotypique k ($=G/N$ = nombre total de MLGs / nombre d'individus) est assez faible (égal à 0,07). L'indice de diversité de Shannon-Weaver H a été calculé selon $H = \sum p_i \ln(p_i)$, où p_i est l'abondance relative de chaque MLG. Cet indice a été transformé en exponentiel tel que e^H peut potentiellement varier entre 1 si un seul MLG présent et N si tous les MLGs ont une fréquence égale. Dans ce secteur, e^H est égal à 4,84 indiquant que les différents MLGs ne sont pas à la même fréquence. En effet, trois MLGs (MLG76 (40%), MLG15 (25%) et MLG81 (19%)) sont bien plus représentés par rapport aux sept autres qui, eux, sont à une fréquence plutôt similaire. Enfin, cette étude révèle que des pucerons issus d'un même arbre ne font pas forcément partie d'un même clone et qu'il est possible qu'il y ait des colonisations multiples et/ou de la reproduction sexuée.

37/45

sélectionnés pour leur variabilité, conduisant à 15 le nombre total de loci microsatellites utilisés pour l'étude à cette échelle.

Parmi les peupleraies échantillonnées en 2011 et 2012, huit peupleraies ont permis d'obtenir suffisamment d'échantillons de pucerons qui ont été prélevés le long de plusieurs transects tous les 21 m en moyenne pour un même transect, au sein d'une même peupleraie. Nous pouvions dès lors estimer la diversité génétique à cette échelle et observer sa distribution dans l'espace pour 3 peupleraies en Centre-Val de Loire (Abilly, Cravant-les-Coteaux et Saint-Germain-sur-Vienne), 3 en Bourgogne (Flammerans, Pontoux, Saint-Marcel) et 2 en Midi-Pyrénées (Lectour et Verdun-sur-Garonne). Les expériences et analyses génétiques conduites entre 2013 et 2015 ont mis en évidence 36 MLGs ou clones aux 15 microsatellites sur l'ensemble des individus.

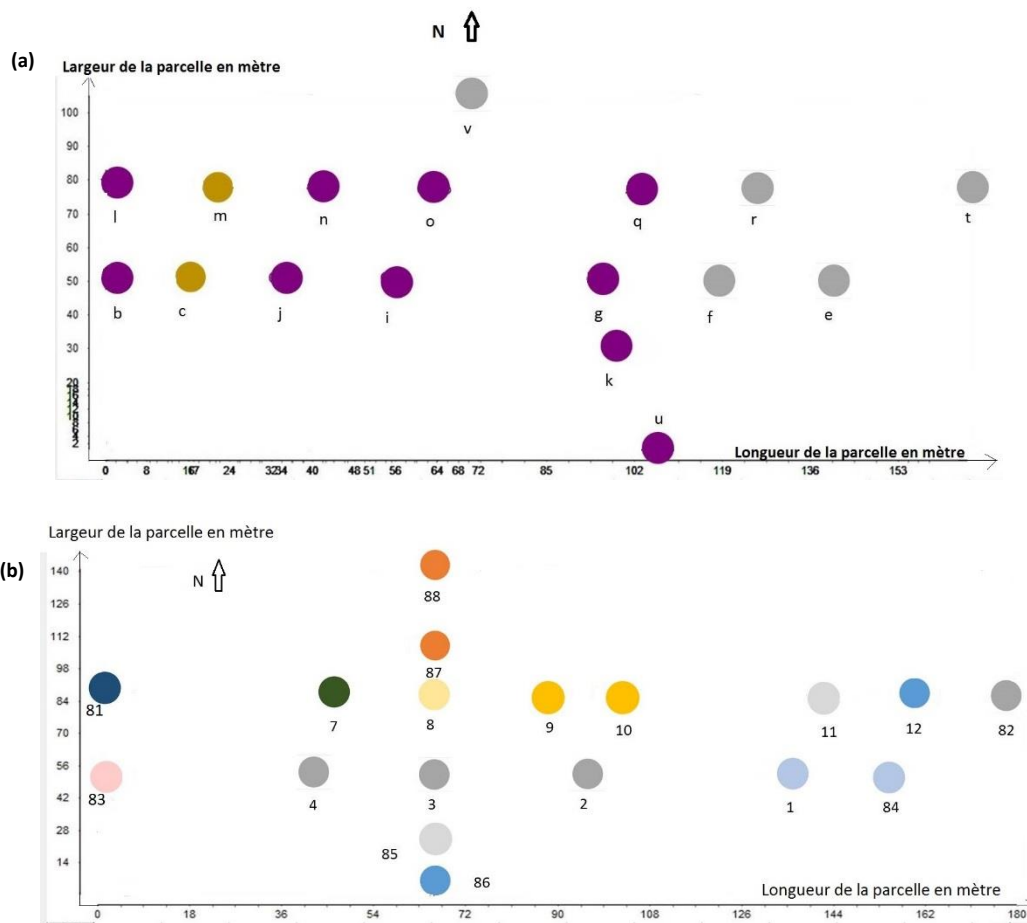


Figure 3. Exemple de deux peupleraies montrant la diversité génétique du puceron lanigère du peuplier et la répartition spatiale des MLGs (ou clones) à l'échelle d'une peupleraie (a) à Cravant-les-Coteaux (Centre-Val de Loire) et (b) à Pontoux (Bourgogne). La position géographique d'un cercle correspond à la localisation du peuplier sur lequel ont été prélevés puis analysés les pucerons. Le numéro à côté de chaque cercle correspond à un code établi pour chaque arbre lors de l'échantillonnage. Chaque couleur représente le génotype multi-loci (MLG ou clone) identifié pour les pucerons analysés à 15 loci microsatellites.

Cette étude a permis de mettre en évidence une grande variabilité dans les niveaux de diversité génétique selon les peupleraies, depuis celles présentant un seul clone de puceron (uniquement le cas en Centre-Val de Loire) jusqu'à celles montrant un grand nombre de MLGs (11 MLGs pour 18 individus à Pontoux en Bourgogne ; Figure 3b), supposant la prédominance de la clonalité dans certaines et la reproduction sexuée et/ou colonisation multiple dans d'autres. Dans certains cas, les MLGs montraient même une certaine structuration dans l'espace à l'échelle d'une même peupleraie.

Cette répartition hétérogène des niveaux de diversité génétique en France pourrait être mise en relation avec les différences d'intensité des pullulations qui seraient alors causées par des populations ne présentant pas les mêmes caractéristiques de reproduction, dispersion et colonisation.

⇒ **L'action 3 visait initialement à rechercher un modèle de prédiction des risques en Région Centre en s'appuyant sur l'échantillonnage. Mais le niveau de population du puceron lanigère en Région Centre s'est avéré nettement plus faible que prévu. Par conséquent, nous avons utilisé les données de signalement et de suivi du puceron lanigère (Département de la Santé des Forêts) ainsi que le nombre de plants vendus chaque année par cultivar. Nous avons donc étudié la dynamique temporelle (dans la région notamment) et confronté un modèle de dynamique temporelle du puceron à ces observations afin de mieux comprendre les facteurs ayant contribué à l'explosion du puceron en France et plus particulièrement dans la région Centre-Val de Loire.**

Cette étude a pour but de mieux comprendre les facteurs qui ont conduit à l'émergence du puceron lanigère dans les peupleraies françaises. Bien qu'il soit connu en France depuis très longtemps, ce n'est que depuis les années 1990 que des pullulations ont été observées, d'abord dans le Sud-Ouest de la France puis progressivement vers le nord (voir Figure 1a). La question du rôle du changement climatique dans l'expansion des pullulations de ce ravageur s'est donc posée. Le puceron étant déjà présent avant l'observation de ces pullulations, nous avons cherché à comprendre l'impact du réchauffement climatique sur la croissance des populations. Par ailleurs, le puceron n'attaquant pas avec la même intensité les différents cultivars de peuplier (variétés hybrides obtenues par sélection), la question du rôle des pratiques sylvicoles s'est également posée. L'objectif était donc de modéliser l'impact du réchauffement climatique et des changements de pratique sylvicole pour discerner le rôle de chacun de ces facteurs dans les pullulations du puceron. Ce travail a été réalisé en collaboration avec Sophie POINTEAU ayant fait sa thèse de doctorat sur le puceron lanigère (2007-2011).

Des expériences en chambre climatique ont permis de développer un modèle degré-jours (Pointeau 2011 ; Pointeau *et al.* in prep). Une accumulation de 198°C-jour au-dessus d'un seuil minimal de 6,4°C et en dessous d'un seuil maximal de 25°C est nécessaire pour accomplir une génération. À partir de ce modèle, il est possible de calculer le nombre annuel de générations dans le passé afin de détecter un éventuel changement dû au réchauffement climatique. Ce nombre de générations a été calculé sur la période 1982-2013 sur une grille de température journalière d'une résolution de 0,25° couvrant la France (données E-OBS issues du projet européen ENSEMBLES). Ensuite, nous avons considéré ce nombre de générations uniquement sur les mailles où des peupleraies étaient présentes (selon les données de l'IGN). Malgré d'importantes fluctuations dans le temps, le nombre de générations aurait effectivement augmenté sensiblement dans l'ensemble des régions françaises. Les deux régions les plus infestées (Aquitaine et Midi-Pyrénées) sont les plus favorables au puceron d'un point de vue climatique avec une moyenne estimée de 13 générations. En Centre-Val de Loire, le puceron a été détecté la première fois en 1998, sans nouvelle détection jusqu'en 2006. Les pullulations se sont alors rapidement étendues jusqu'en 2013 (source : DSF). D'après nos estimations du nombre de générations, le Centre-Val de Loire serait également très favorable, dépassant 12 générations en 1997, 2003, 2005, 2006, 2009 et 2011. Il semble toutefois difficile d'identifier un seuil climatique unique en France qui pourrait expliquer les pullulations du puceron. En couplant ces estimations et les données d'observation du DSF, il semble que les pullulations sont observées à partir de 9 générations par an et en moyenne pour 12 générations par an.

Afin d'explorer le rôle des pratiques sylvicoles, nous avons cherché à estimer le nombre de cultivars sensibles sur pied. Pour cela, nous avons considéré le nombre de cultivars plantés chaque année dans chaque région entre 1996 et 2012. Ce nombre total de plants vendus diminue avec les années. Nous avons ensuite calculé pour chaque région le pourcentage de cultivars sensibles (I214 et I45/51) plantés. Il n'y a pas de tendance générale qui se dégage en fonction des années. Ce pourcentage était particulièrement élevé (environ 70%) en 1996 dans les régions les plus infestées. Toutefois, ce

pourcentage diminue sensiblement ces dernières années dans certaines régions (par exemple, en Aquitaine et en Centre-Val de Loire). Étant donnée une durée de rotation moyenne de 18 ans, nous avons pu estimer le nombre total de cultivars sensibles présents dans chaque région chaque année ainsi que leur pourcentage par rapport à tous les cultivars de peupliers. Les régions Aquitaine et Midi-Pyrénées offrent au puceron les ressources les plus favorables à la fois en pourcentage et en nombre de cultivars sensibles. Alors que le pourcentage d'attaque (P_{ATT}) n'était pas corrélé avec le nombre de générations potentiel (G) ou le pourcentage de cultivars sensibles plantés, il est corrélé avec ce nombre de cultivars sensibles sur pieds ($R^2=0.12$, $P < 0.001$).

Enfin, nous avons combiné les deux facteurs : l'effet du climat à travers le nombre de générations annuel et l'effet des pratiques sylvicoles. Pour cela, nous avons considéré le risque R comme suit :

$$R = \begin{cases} 0 & \text{si } G < 9 \\ \text{fonction linéaire allant de } 0 \text{ à } P_{ATT} & \text{si } 9 \leq G < 12 \\ P_{ATT} & \text{si } G \geq 12 \end{cases} \quad \text{Équation 1}$$

Nous montrons ainsi que pour les régions du sud avec un climat largement favorable, ce risque de pullulation est principalement affecté par le nombre de cultivars sensibles qui a tendance à diminuer progressivement (par exemple, en Aquitaine et Midi-Pyrénées). Pour les régions plus au nord avec un climat pas toujours favorable, ce risque fluctue nettement plus d'une année sur l'autre en fonction des températures correspondantes (par exemple, en Centre-Val de Loire) (Figure 4).

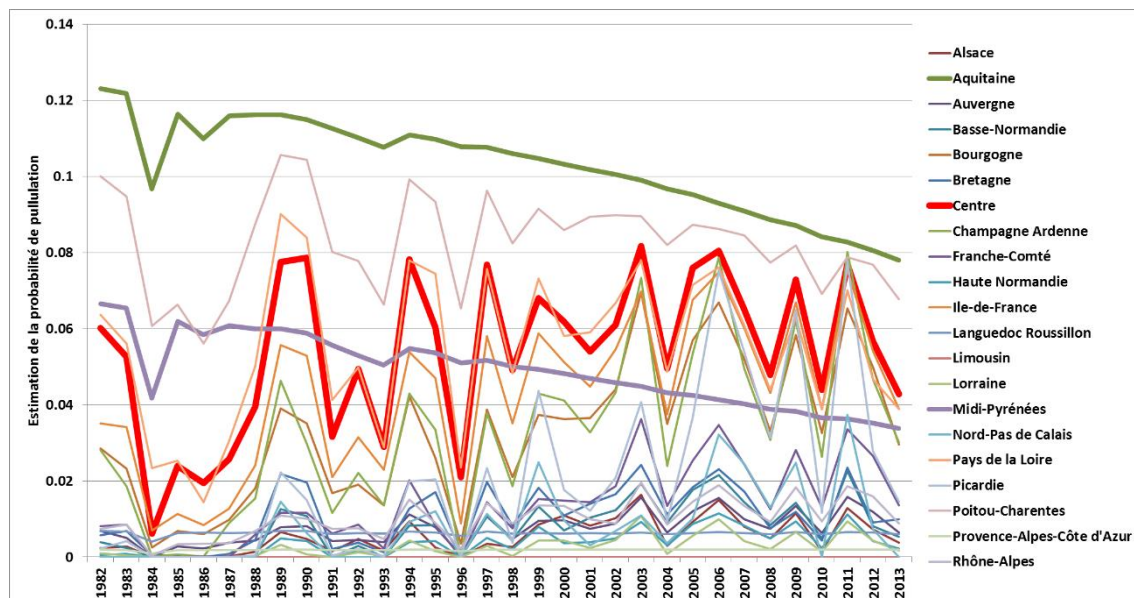


Figure 4. Estimation de la probabilité de pullulation (R) du puceron lanigère du peuplier en fonction des années et des régions.

Cette étude montre que le réchauffement climatique augmente sensiblement le nombre de générations que le puceron peut faire mais ne peut expliquer à lui seul les pullulations du puceron observées en France depuis 1996. La plantation de cultivars sensibles au puceron pourrait avoir joué un rôle dans ces pullulations et le nombre de peupliers sensibles sur pied explique significativement le taux d'attaque. La tendance observée à la diminution du nombre de peupliers montre que le nombre de peupliers sensibles sur pied décroît, réduisant ainsi le risque de pullulation du puceron. L'effet combiné de ces deux facteurs contrastés, réchauffement climatique et des pratiques sylvicoles, est donc relativement complexe. Le réchauffement climatique va probablement s'intensifier alors que les cultivars les plus sensibles vont probablement être de moins en moins utilisés. Avec deux facteurs aux effets opposés qui vont se renforcer, l'équilibre entre les deux reste difficile à prévoir.

Tâche 6 «rouille du peuplier»

⇒ **L'objectif de cette tâche était de fournir une première illustration des conséquences de la mise en présence par l'homme – en ville ou à la campagne – et hors de leur zone de sympatrie naturelle, des hôtes de la rouille foliaire à *Melampsora larici-populina*, à savoir les peupliers et les mélèzes.**

Cette action était évidemment dépendante du déroulement des actions d'inventaire préalables mais également :

- de la présence du champignon
- de la possibilité de quantifier le niveau d'infestation des arbres

Il était initialement prévu de réaliser cette quantification au cours de l'inventaire de terrain, mais cette option était illusoire du fait de la saisonnalité du phénomène et de la nécessité d'observer tous les arbres au même moment si l'on veut rendre compte de la dynamique du champignon.

L'observation des peupliers noirs fastigiés à l'occasion des récoltes de matériel végétal de la Tâche 3 (été 2014, période favorable à l'observation de la rouille) nous a conduits à élaborer une nouvelle stratégie d'étude. En effet, la rouille était peu présente et les arbres se montraient peu variables quant à leur niveau d'infestation.

Il a donc été décidé

- 1- que cette tâche analyserait le phénomène épidémique dès son premier stade, à savoir sur les mélèzes
- 2- que l'absence de variabilité quantitative du phénomène, si elle se confirmait également sur mélèze, pouvait cacher une variabilité qualitative qui pourrait être révélée par analyse moléculaire.

Deux actions ont donc été définies et mises en œuvre en 2015.

Action 1 : quantification de la présence de rouille sur les mélèzes urbains

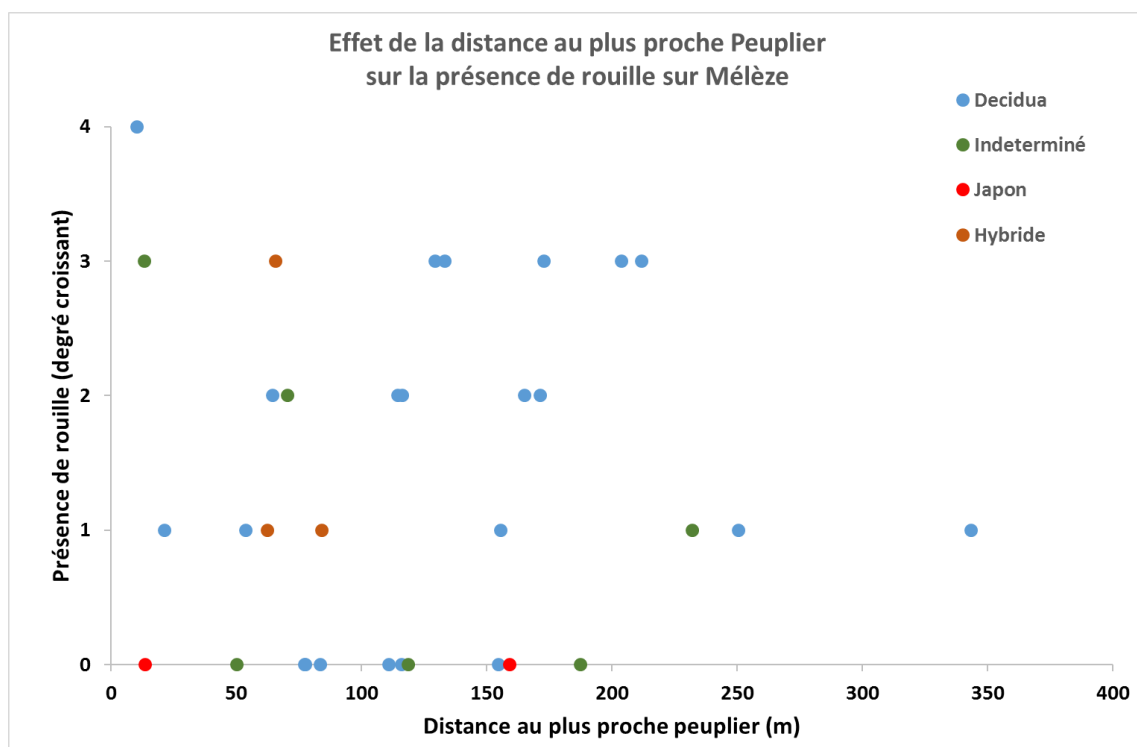
Parmi les 50 mélèzes inventoriés dans la Tâche 1, 33 ont pu être approchés. L'étude a été réalisée du 23 avril au 7 mai 2015. Sur chaque arbre, la quantité de rouille présente a été appréciée selon une échelle à 5 classes :

- 0 = pas d'écidies de rouille détectées
- 1 = quelques écidies trouvées après une longue inspection
- 2 = une inspection rapide permet de trouver quelques écidies
- 3 = on trouve facilement des écidies
- 4 = on constate même à distance la présence d'écidies



Ecidies de rouille à *Melampsora larici-populina* sur un mélèze inventorié en Tâche 1

Le champignon a pu être trouvé sur ces mélèzes urbains, signe que le champignon est en mesure d'y boucler sur son cycle biologique du fait de la mise en présence – par l'homme – de ses deux hôtes en dehors de leur aire commune de répartition naturelle. Ces données ont été confrontées à la distance au plus proche peuplier (d'une espèce potentiellement hôte du champignon, donc trembles, blancs et grisards exclus). Même si on pourrait voir une tendance logique à une diminution de la présence de rouille avec l'éloignement au plus proche peuplier (figure ci-dessous), cette tendance ne tient qu'à quelques points et ne peut pas être considérée comme significative. Il est intéressant de constater que les Mélèzes du Japon ne sont jamais porteurs de rouille tandis que les hybrides Japon*Europe n'héritent visiblement pas de cette résistance au champignon.



Etude du lien entre la présence au plus proche peuplier (espèces hôtes du champignon uniquement) et la présence de rouille à *Melampsora larici-populina* sur les mélèzes urbains inventoriés en Tâche 1.

Pour le reste, nous faisons l'hypothèse (sur la base de nos observations de terrain), que l'environnement des mélèzes en termes de couverture du sol et de barrières physiques au vent (et donc de présence de feuilles mortes de peupliers à proximité des mélèzes au printemps plus que des peupliers eux-mêmes), joue également un rôle dans la présence de rouille.

Action 2 : étude de la diversité génétique de la rouille sur mélèzes urbains

Des prélèvements ont été effectués sur l'ensemble des mélèzes porteurs de rouille. Entre 1 et 13 aiguilles porteuses de rouille ont été prélevées sur chaque individu au cours de la notation de terrain.

Ces aiguilles ont été traitées en laboratoire selon un protocole en 4 étapes :

- Comptage du nombre d'écidies sur chaque aiguille
- inoculation d'un disque foliaire de peuplier avec chaque aiguille infectée
- Inoculation du produit de l'étape précédente sur une feuille entière de peuplier et suivi en chambre climatisée.
- Isolement d'urédosores sur les feuilles de l'étape précédente. Sur chaque feuille ont été isolés 6 fois le nombre d'écidies compté dans la première étape. Ces urédosores servent de base au génotypage et sont conservés à -80°C.

A partir de 142 aiguilles prélevées, ce sont plus de 800 urédosores de rouille qui ont été prélevés et qui sont disponibles pour une analyse moléculaire qui sera réalisée en aval de ce projet.

Tâche 7 «gestion du projet, bases de données, transfert»

Action 1 : architecture de la base, mise en forme des couches de données

Cette question a été traitée au cours de différents COPIL et COTECH .

L'ensemble des données géoréférencées générées par ce projet a vocation à être transférée aux partenaires non académiques. Pour assurer une pleine compatibilité avec leur système d'information géographique, 2 formats ont été générés :

- Tableaux Excel
- Shapes au format ArcGis (ESRI)

Action 2 : comité de pilotage, stratégie de diffusion

- **Le comité de pilotage (COPIL)** du projet était constitué de représentants de l'ensemble des partenaires académiques et non académiques. Il s'est réuni trois fois au cours du projet.

Y ont été associés des invités extérieurs, en particulier les organismes ayant manifesté leur intérêt pour ce projet au moment de sa conception : ville d'Orléans, AggLO, CRPF, Arbocentre.

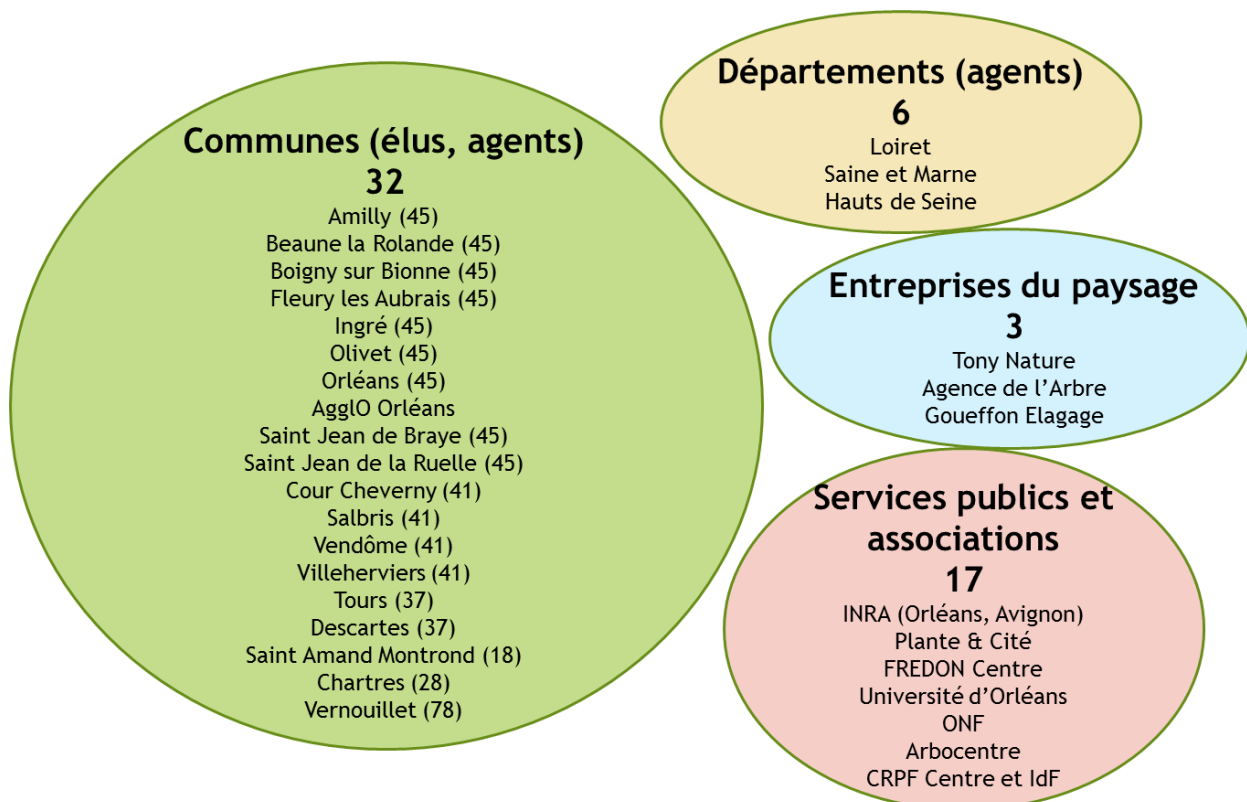
Les comptes-rendus de ces comités ainsi que les feuilles d'émargement sont fournis en annexe de ce rapport.

Le premier COPIL s'est tenu le 03/02/2012 au matin tandis qu'un Comité Technique s'est tenu l'après-midi. Ils ont donné lieu à un compte-rendu exhaustif.

Le second COPIL s'est tenu le 04/12/2012 après-midi. Cette fois le COTECH s'est tenu au préalable de sorte que ses décisions ont été ensuite validées en COPIL. Un relevé de décisions a été produit.

Le dernier COPIL s'est tenu le 06/05/2014. Il n'a pas donné lieu à CR, l'essentiel de ce qui a été présenté faisant partie du présent Compte-Rendu scientifique.

- Outre les productions académiques, ce projet avait pour vocation une **communication la plus large possible**, à destination d'acteurs locaux et du grand public. Le détail de ces actions de communication est donné dans l'Annexe 1 (Indicateurs du projet). On peut souligner que:
 - Les résultats majeurs présentés dans ce compte-rendu seront rendus publics sur une page internet hébergée au sein du site du partenaire Plante & Cité
 - Ce projet s'est conclu par un colloque de restitution (programme et liste des participants en annexe) co-organisé avec le partenaire Plante & Cité qui a permis de présenter les résultats du projet mais également d'ouvrir à d'autres problématiques sanitaires concernant les arbres hors forêt. Cette formule a suscité l'intérêt d'un très large public. La figure suivante montre la diversité des participants à cet événement.



Répartition des inscriptions au colloque de restitution final du projet