

**AFPP – CINQUIEME CONFERENCE INTERNATIONALE
SUR LES METHODES ALTERNATIVES DE PROTECTION DES PLANTES
LILLE – 11 AU 13 MARS 2015**

**INFLUENCE DU CONTEXTE PAYSAGER SUR LES ATTAQUES DE PROCESSIONNAIRE DU PIN EN VILLE
QUELLES PERSPECTIVES DE METHODES DE LUTTE ALTERNATIVES ?**

J. ROUSSELET ⁽¹⁾, V. IMBAULT ⁽¹⁾, T. LAMANT ⁽²⁾, C. GUTLEBEN ⁽³⁾, S. PIERON ⁽⁴⁾, M. GUERIN ⁽³⁾,
C. KRUCZKOWSKI ⁽⁴⁾, J. GARCIA ⁽¹⁾, A. BERNARD ⁽¹⁾ et J.-P. ROSSI ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ INRA, UR633 Zoologie Forestière, 2163 avenue de la pomme de pin, CS 40001, F-45075 Orléans

⁽²⁾ CGAF, USC ONF-INRA, 2163 avenue de la pomme de pin, CS 40001, F-45075 Orléans

⁽³⁾ Plante et Cité, Maison du végétal, 26 rue Jean-Dixméras 49066 Angers Cedex 1

⁽⁴⁾ FREDON-Centre, Cité de l'Agriculture, 13 avenue des Droits de l'Homme, F-45921 Orléans Cedex 9

⁽⁵⁾ INRA, UMR1062 CBGP (INRA/IRD/Cirad/Montpellier SupAgro), Campus International de
Baillarguet, CS 30016, F-34988 Montferrier-sur-Lez Cedex, France

RÉSUMÉ

La processionnaire du pin est un insecte défoliateur et urticant inféodé à des résineux forestiers. Elle se propage dans les milieux non forestiers en utilisant les plantations ornementales de ses arbres-hôtes. Dans les zones urbanisées, sa présence pose des problèmes de santé publique auxquels les collectivités territoriales doivent faire face. Nous avons réalisé un inventaire de tous les pins, cèdres et Douglas, et des nids d'hiver qu'ils hébergent, sur le territoire de cinq communes de l'agglomération orléanaise. Nous avons commencé à conduire sur ce jeu de données des analyses d'écologie spatiale et des analyses de voisinage prenant en compte l'influence sur le niveau d'infestation d'un arbre des caractéristiques des autres arbres-hôtes présents dans son environnement. Nous présentons ici les résultats préliminaires de cette approche paysagère en milieu urbain. A terme, l'objectif de ce travail est d'explorer les possibilités de concevoir des infrastructures vertes qui, au lieu de fournir des corridors d'expansion à cette espèce, pourraient en réduire le niveau de nuisance.

Mots-clés : arbre hors forêt, arbre en ville, plantes ornementales, continuités écologiques, « *disservices* » écosystémiques.

ABSTRACT

RELATIONSHIP BETWEEN LANDSCAPE CONTEXT AND INFESTATION OF THE PINE PROCESSIONARY MOTH IN URBAN AREAS: WHAT PERSPECTIVES FOR DEVELOPING ALTERNATIVE CONTROL METHODS BASED ON LANDSCAPE MANAGEMENT?

Pin tree plantations. We conducted an inventory of all the potential host trees of this species and of its winter tents over an urban area of about 6500 ha. Here we present the preliminary results of a spatial ecology approach and of a neighbourhood analysis exploring relationships between the level of infestation on a given tree and the features of the other host trees occurring around it. The ultimate goal of this work is to help defining urban green infrastructures unfavourable to the spread of this pest.

Keywords: Tree outside forest, urban tree, ornamental plant, ecological corridor, ecosystem disservices.

INTRODUCTION

L'arbre en ville fournit de nombreux services écosystémiques et les forêts urbaines sont un élément majeur des infrastructures vertes (Tyrvainen *et al.*, 2005 ; McDonnell *et al.*, 2009 ; Clergeau et Blanc, 2013). La politique nationale des « Trames Vertes et Bleues » (TVB), mise en place suite au « Grenelle de l'Environnement », vise à préserver et à développer ces infrastructures écologiques sur l'ensemble du territoire (Bergès *et al.*, 2010 ; Clergeau et Blanc, 2013 ; Sordello *et al.*, 2014). La fragmentation des habitats, liée aux changements d'usage des sols et en particulier à l'urbanisation, entraîne une érosion de la biodiversité. Il s'agit donc au travers du développement des TVB de maintenir les continuités écologiques, y compris en milieu urbain, pour faciliter la circulation des espèces et éviter l'isolement de leurs populations (Bergès *et al.*, 2010 ; Clergeau et Blanc, 2013).

Toutefois, malgré les multiples bénéfices fournis, l'arbre en ville peut aussi être perçu comme une source de nuisances et reste, pour les collectivités territoriales et leurs administrés, un sujet sensible à l'origine notamment de nombreux conflits de voisinage (hébergement d'espèces considérées nuisibles et émergentes, allergies liées aux pollens, feuilles bouchant les gouttières, risques de chute de branches, salissures, dégradation des véhicules stationnés, etc.). Mais un aspect majeur, largement sous-étudié, est le risque d'effets négatifs non intentionnels (« *ecosystem disservices* ») dans un contexte de changement climatique et de mondialisation économique à l'origine de phénomènes d'expansions et d'invasions biologiques (Dehnen-Schmutz *et al.*, 2010 ; Pautasso *et al.*, 2010 ; Tubby & Webber, 2010).

Le commerce de plantes ornementales est le vecteur de nombreuses introductions accidentelles d'organismes allochtones et un pourvoyeur majeur d'espèces exotiques envahissantes (Dehnen-Schmutz *et al.*, 2007 ; Pautasso *et al.*, 2010 ; Pysek *et al.*, 2010 ; Robinet *et al.*, 2012 ; Martinez *et al.*, 2014). Les villes constituent des points d'entrée, d'établissement et de propagation pour ces espèces (Smith *et al.*, 2007 ; Pysek *et al.*, 2010 ; Saumel et Kowarik, 2010). Les plantes ornementales des villes et villages peuvent donc à la fois constituer des réservoirs insoupçonnés de biodiversité (*e.g.* Fortel *et al.*, 2014) et des corridors permettant la circulation de ravageurs natifs ou exotiques dans des milieux qui leur seraient sans cela défavorables (*e.g.* Rossi *et al.*, 2013 ; Rousselet *et al.*, 2013). Sans attention particulière prêtée à cette question dès leur conception, les TVB pourraient favoriser non seulement la biodiversité considérée utile, patrimoniale ou ordinaire (effet positif recherché) mais aussi des espèces envahissantes à impact économique, sanitaire et/ou écologique (effet négatif non intentionnel). Un des enjeux de l'agro-écologie est de comprendre comment l'organisation spatiale et temporelle des systèmes de culture à l'échelle des territoires et paysages affecte la dynamique des bioagresseurs et des espèces auxiliaires afin de développer de nouvelles méthodes de gestion, comme par exemple la lutte culturale ou la lutte biologique par conservation (*e.g.* Rusch, 2010).

Nous présentons ici les tout premiers résultats, à caractère préliminaire et exploratoire, des recherches sur une approche paysagère en milieu urbanisé que nous avons engagée sur la processionnaire du pin, un insecte à impact phytosanitaire et sanitaire en expansion sous l'effet du changement climatique (Amouroux, 2013 ; Roques, 2015). Les chenilles de ce lépidoptère sont urticantes et constituent en France le premier défoliateur forestier (Nageleisen *et al.*, 2010). Elles sont originaires du bassin méditerranéen et s'attaquent aux pins et aux cèdres natifs ou exotiques, voire occasionnellement à d'autres conifères exotiques comme le Douglas. Ses plantes-hôtes sont utilisées aussi bien en forêt qu'en ornement, et Rossi *et al.* (2013) ont montré que le compartiment ornemental des zones non forestières était une composante négligée mais essentielle de la dynamique spatiale de cette espèce. C'est à cette composante ornementale des villes et villages (Rousselet *et al.*, 2013 ; Rossi *et al.*, 2013) qu'est également associé l'essentiel des problèmes de santé publique dus à cette espèce (Moneo *et al.*, 2015).

Notre approche repose sur un inventaire exhaustif de la processionnaire du pin et de ses arbres-hôtes hors forêt à l'échelle de plusieurs communes d'une même agglomération. Notre objectif est de mettre en évidence et de décrire des patrons spatiaux des infestations de processionnaire afin d'identifier d'éventuelles variables environnementales et paysagères susceptibles d'en rendre compte. Une fois des facteurs potentiellement explicatifs mis en lumière, il deviendra possible de définir des plans d'expérience permettant de tester l'existence de relations causales. Si ces facteurs correspondent à des

caractéristiques modifiables de l'environnement urbain, il deviendra alors envisageable de définir des méthodes de gestion alternatives basées sur la gestion du contexte paysager. Nous comptons en particulier nous appuyer sur cette description des patrons de distribution des arbres et des infestations de processionnaire pour rechercher des relations avec la structure de l'espace urbain lui-même (usage des sols, type d'habitation, taille du foncier, etc. permettant d'établir des cartes de risques) et avec la composition de l'environnement en végétaux-hôtes (qui paraît modifiable à travers l'évolution des pratiques ornementales et des choix de plantation).

MATERIEL ET MÉTHODES

ESPECE MODELE : LA PROCESSIONNAIRE DU PIN ET SES ARBRES-HOTES

La processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa*, est un insecte lépidoptère dont les chenilles se nourrissent d'aiguilles de pins (*Pinus spp.*), de cèdres (*Cedrus spp.*), voire de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*). L'ensemble de ces essences a donc été pris en compte dans cet inventaire. Son essence préférée est le pin noir (*Pinus nigra*), suivi en France du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et du pin maritime (*Pinus pinaster*), mais de nombreuses essences natives ou exotiques sont susceptibles d'être attaquées à des degrés divers en fonction des préférences des femelles et des performances larvaires (Démolin, 1969 ; Huchon et Démolin, 1970 ; Montoya, 1981 ; Hódar *et al.*, 2002 ; Roques, 2015 ; Piou, comm. pers.). En un lieu donné, la gamme d'essences-hôtes attaquées dépend de l'année et du niveau de population. Plus celui-ci est bas, plus les attaques sont restreintes aux essences préférées. Les chenilles sont grégaires et tissent dans les arbres des nids visibles à plusieurs mètres (voire dizaines de mètres). En région Centre, ces nids sont facilement observables d'octobre à avril lorsque l'activité de tissage est importante. Ils continuent à être encore observables après que les chenilles les aient quittés au printemps jusqu'en mai-juin.

ZONE ET DATES D'ETUDE : LE NORD DE L'AGGLOMERATION ORLEANAISE DURANT LA SAISON 2012-2013

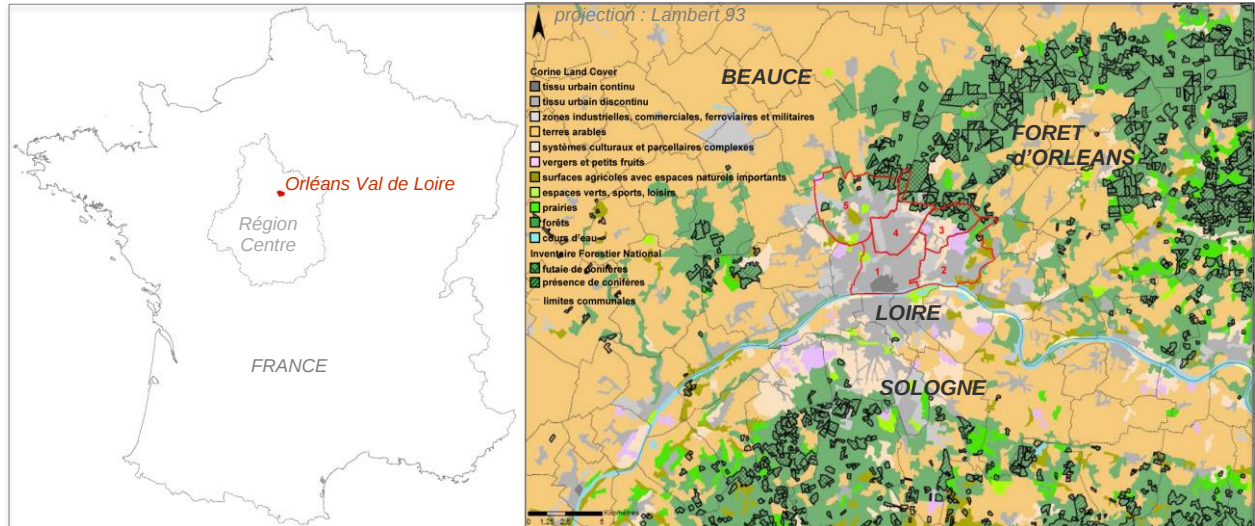
La zone d'étude correspond au territoire de cinq communes du nord de l'agglomération orléanaise (Saint-Jean-de-Braye, Semoy, Fleury-les-Aubrais, Saran, et Orléans-nord ; département du Loiret, région Centre, France ; cf. Rousselet *et al.*, 2013). La superficie totale de la zone d'inventaire est de 6493 ha. Cette zone urbaine est insérée entre Sologne et Loire au sud, forêt d'Orléans au nord-est et Beauce au nord-ouest (figure 1). Le centre ville d'Orléans correspond à un tissu urbain continu (selon la nomenclature *Corine Land Cover*) et à un habitat dense (figure 1). La périphérie de l'agglomération est surtout composée de maisons individuelles avec jardin et de zones industrielles et commerciales. Les communes de Saran, Fleury-les-Aubrais, Semoy et Saint-Jean-de-Braye jouxtent la forêt d'Orléans qui émerge en partie sur leur territoire. Ces parties de leur territoire correspondent à des parcelles forestières déjà inventoriées par l'Inventaire Forestier National (figure 1) qui n'ont pas été prises en compte dans ce travail. Les communes de Saran et de Saint-Jean-de-Braye se situent également à l'interface avec des milieux agricoles ouverts (figure 1 ; cf. aussi Rossi *et al.*, 2013). L'inventaire géoréférencé des arbres hôtes hors forêt de la processionnaire du pin et le dénombrement des nids hébergés par ces derniers a été réalisé du 1^{er} novembre 2012 au 21 juin 2013.

METHODE D'INVENTAIRE

Elle a été décrite précisément dans Rousselet *et al.* (2013). Nous rappellerons ici simplement que (i) seuls les arbres isolés, les arbres d'alignement et les petits bosquets ont été inventoriés durant cette première phase d'inventaire (à l'exclusion donc des surfaces de nature forestière) (ii) l'ensemble des voies et du domaine public de la zone d'étude a été parcouru à pied ou en vélo (iii) dans le cas de grandes propriétés privées ne garantissant pas une observation exhaustive depuis la voie publique, l'autorisation d'accès a été demandé au propriétaire du terrain (iv) les observations au sol ont également été complétées par des observations faites depuis des points hauts (notamment des grands bâtiments) (v) pour chaque arbre inventorié, il a été noté si le dénombrement des nids était exhaustif (arbre observable dans sa totalité), partiel ou impossible (vi) le nombre de nids a été compté exhaustivement de 0 à 20, et noté "21 et +" au-delà.

Figure 1 : Localisation géographique et environnement 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) ; en gris au centre, emprise des zones urbanisées de l'agglomération Orléans Val de Loire ; en noir hachuré, délimitation des parcelles forestières où des conifères sont présents (source IFN)

(Geographic location of the study area - in red - and land use in the surroundings)



ANALYSE DES DONNEES

Analyses géostatistiques

Nous avons utilisé les géostatistiques pour étudier la structure spatiale de la variable présence / absence de nids de processionnaire. Cette approche se décompose en deux phases : 1) l'analyse du variogramme qui indique la présence d'une structuration non-aléatoire des données et fournit des informations sur les échelles auxquelles les structures sont observées et 2) l'interpolation par krigeage qui permet de produire des cartes de probabilité de présence de nids pour la zone étudiée. Le lecteur trouvera tous les détails dans l'ouvrage de Pierre Goovaerts (1997).

Analyses de voisinage

Pour chaque arbre inventorié, on a considéré un voisinage constitué de l'ensemble des arbres potentiellement hôtes présents dans un cercle de rayon égal à 50 m. L'arbre sur lequel est centrée la zone de voisinage et mesurée l'infestation est dénommé ci-après « arbre cible ». A l'intérieur de la zone de voisinage de chaque arbre, on a ensuite estimé la richesse spécifique, la densité d'essences présentant potentiellement un fort *versus* un faible niveau d'infestation, ainsi que la densité d'arbres de taille supérieure à l'arbre cible. Le niveau d'attaque est considéré sous l'angle de la prévalence qui mesure la fréquence des arbres ayant au moins un nid.

RESULTATS

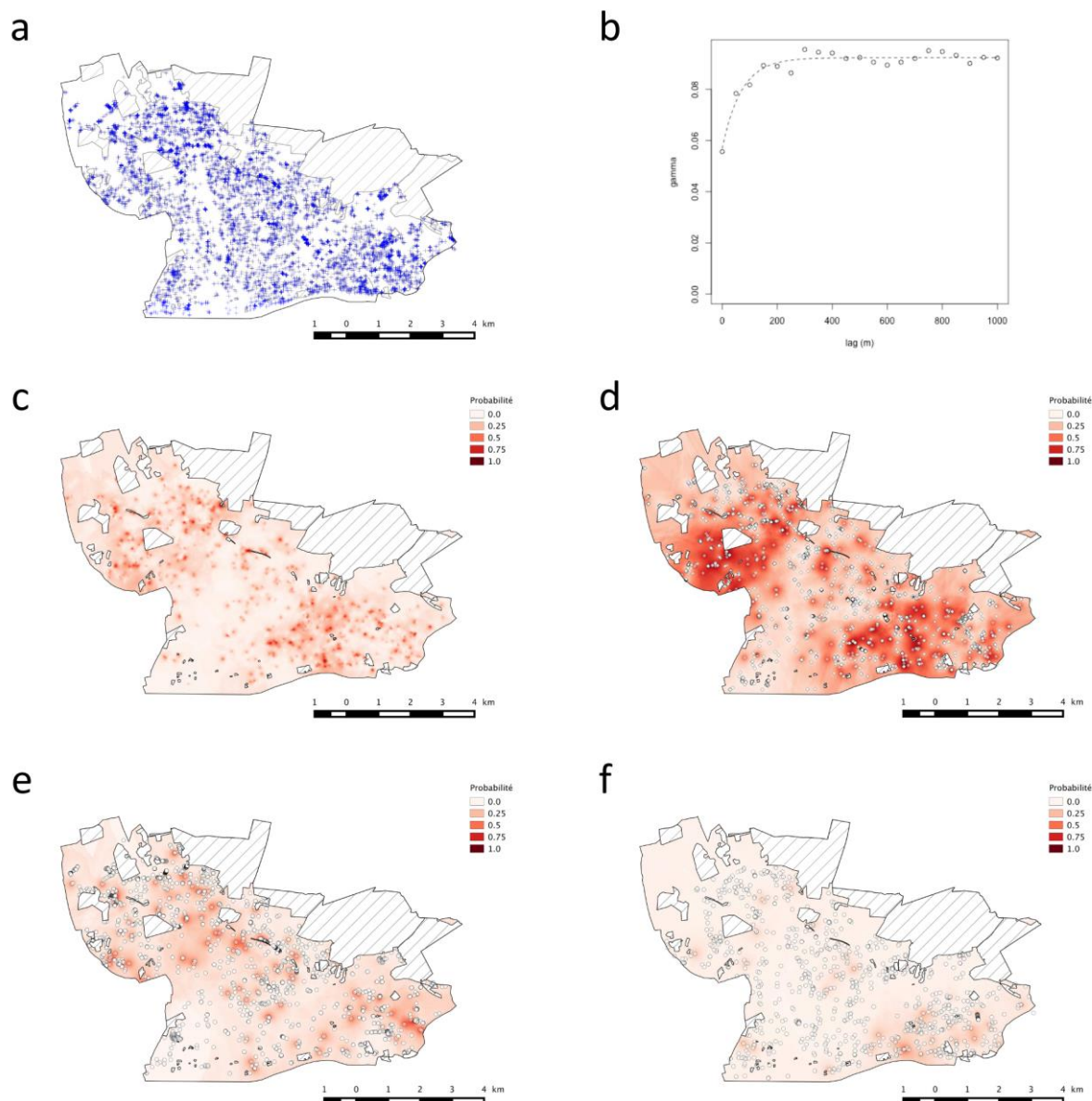
DISTRIBUTION DES ARBRES-HOTES ET DES ATTAQUES DE PROCESSIONNAIRE

Distribution spatiale des arbres-hôtes

Un total de 9321 arbres a été inventorié et géoréférencé. Ils appartiennent principalement aux essences suivantes : *P. nigra*, *P. sylvestris*, *P. pinaster*, *P. pinea*, *P. mugo*, *P. wallichiana*, *P. strobus*, *C. deodara*, *C. atlantica*, *C. libani*, *P. menziesii* (cf. figure 3). La figure 2a montre leur distribution spatiale à l'échelle des cinq communes prospectées (cf. Rousselet *et al.* 2013 pour la distribution spatiale essence par essence), ainsi que les zones qui n'ont pas été visitées (parcelles recensées par l'IFN, terrains militaires, terrains privés pour lesquels l'autorisation du propriétaire n'a pas pu être obtenue, représentant un total de 1579 ha soit 24% du territoire de la zone d'étude).

Figure 2 : 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*

(Host tree distribution within the study area – blue crosses – and spatial structure of the pine processionary moth – maps of probability of PPM presence)



Distribution spatiale des infestations de processionnaire du pin

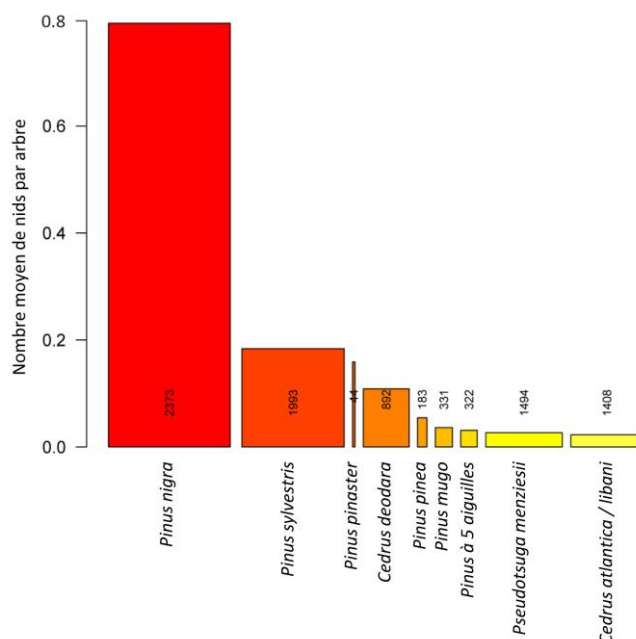
La forme variogramme (Figure 2b) indique la présence d'une structuration spatiale forte de la variable présence / absence des nids de processionnaire estimée pour l'ensemble des essences considérées dans l'étude. Cette dépendance spatiale s'exprime jusqu'à des distances d'environ 200 m. Une structure spatiale est observée pour les essences suivantes : *Pinus nigra*, *Pinus sylvestris*, *Cedrus deodara*. Pour les autres essences on n'observe aucune structuration spatiale des attaques de processionnaire soit parce que l'abondance des nids est trop faible soit car l'essence elle-même n'est pas présente en densité suffisante dans la ville pour permettre l'analyse statistique. La cartographie par krigeage sur l'ensemble de la zone étudiée (Figure 1 c – f) révèle la présence de *patches* de taille réduite distribués à travers la ville. La valeur des probabilités varie suivant l'espèce considérée et reflète les différences d'abondance de nids observés sur le terrain (cf. Figure 2). On note que les cartes révèlent des distributions en partie disjointes entre espèces.

Niveau d'infestation en fonction des essences

La figure 3 montre que le nombre moyen de nids par arbre varie fortement en fonction des essences. Le pin noir est l'essence la plus attaquée tandis que le Douglas et les cèdres de l'Atlantique et du Liban sont

les moins attaquées. Les trois essences les plus attaquées, pour lesquelles nous disposons d'un effectif important dans notre jeu de données, sont le pin noir (*Pinus nigra*), le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et le cèdre de l'Himalaya (*Cedrus deodara*). Les deux premières sont natives de l'aire de distribution de la processionnaire du pin (mais pas de la région inventoriée), la troisième est une essence exotique. La position du pin maritime (*Pinus pinaster*) dans ce classement reste difficile à apprécier vu la faiblesse de ses effectifs dans notre inventaire. Pour l'analyse de voisinage, nous avons donc considéré deux groupes en fonction de leur niveau d'infestation (i) les essences 'fortement attaquées' avec plus de 0.1 nid en moyenne par arbre (*Pinus nigra*, *Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster*, *Cedrus deodara*) et les essences 'faiblement attaquées' avec moins de 0.1 nid (*Pinus pinea*, *Pinus mugo*, *Cedrus atlantica* / *libani*, *Pseudotsuga menziesii*, et les pins à cinq aiguilles)

Figure 3 : 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)



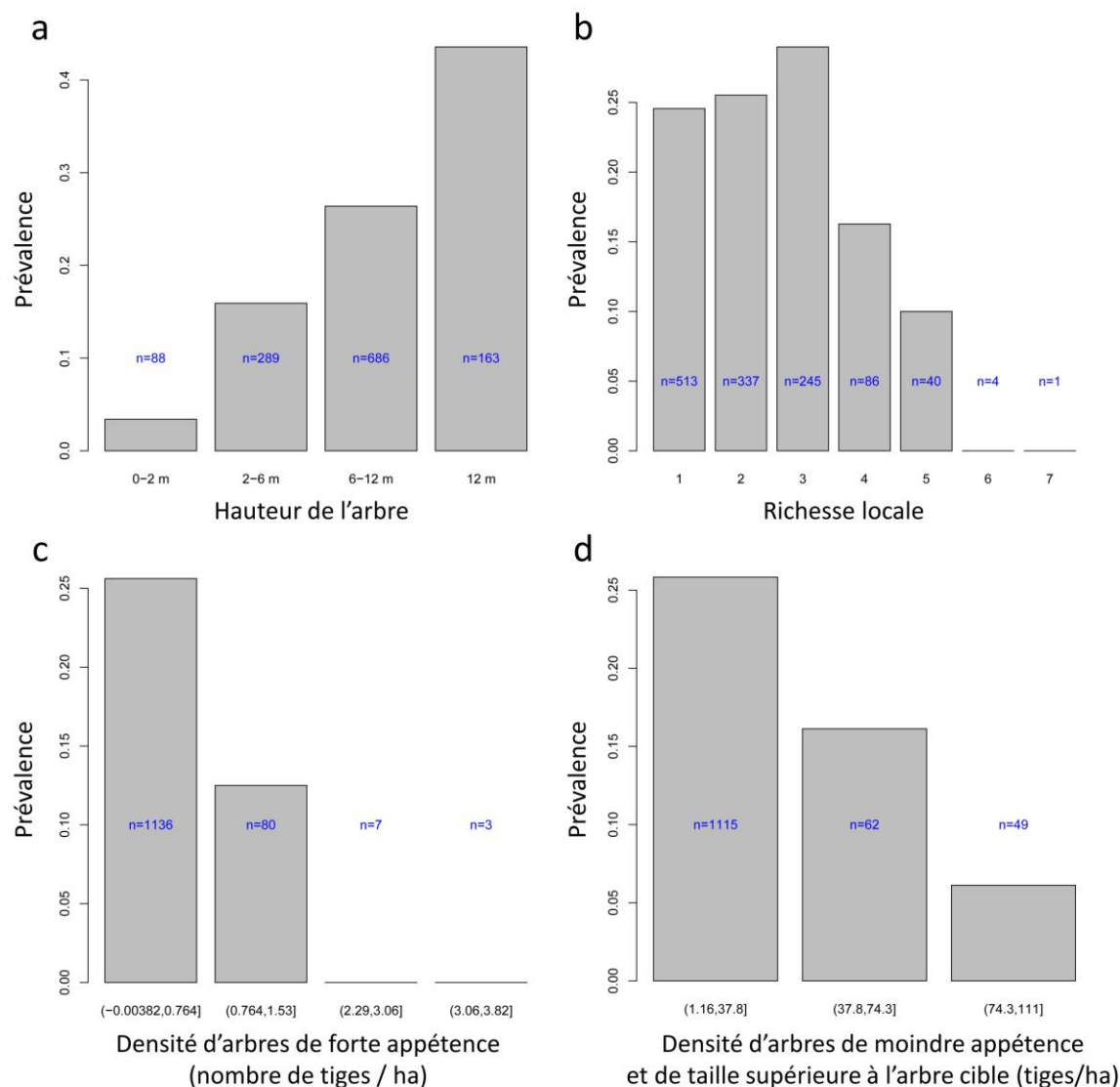
(Level of infestation of the different host tree species in winter 2012-2013 over the five communes studied in Orléans Val de Loire)

ANALYSE DE VOISINAGE

Nous présentons les résultats obtenus pour l'espèce la plus représentée dans l'agglomération étudiée, le pin noir, *P. nigra*. La figure 4a montre qu'en moyenne, le niveau d'attaque (ici la prévalence) des pins noirs augmente avec leur taille. On observe une décroissance des attaques avec la richesse spécifique observée dans le voisinage des arbres (Figure 4b). De même, la prévalence diminue avec le nombre d'essences à fort potentiel d'infestation dans le voisinage (*P. nigra*, *P. sylvestris*, *P. pinaster*, *C. deodara*). Une relation similaire est observée avec les essences les moins attaquées lorsqu'elles sont de taille supérieure à l'arbre cible.

Figure 4 : 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.

(Prevalence of infestation by *Thaumetopoea pityocampa* in *P. nigra* according to (a) tree height (b) species richness within a radius of 50 m (c) density of trees belonging to the group of the most favourable host tree species (radius of 50 m) (d) density of trees belonging to the group of the less favourable host tree species but having a height greater than the tree located at the center of the buffer (radius of 50 m))



DISCUSSION

Les arbres hôtes de la processionnaire du pin sont présents à une densité qui varie peu selon les communes, à l'exception du centre ville d'Orléans, au cœur de l'agglomération, où l'habitat est très dense (figure 2a, et Rousselet *et al.*, 2013). Par contre, l'année de notre inventaire, les infestations sur l'ensemble des essences (et sur les trois essences préférées considérées séparément) n'étaient pas réparties uniformément dans l'espace (figure 2c-f). Les communes de Saran, Saint-Jean-de-Braye et Fleury-les-Aubrais jouxtent toutes les trois la forêt d'Orléans, souvent considérée comme une source de populations du fait de la présence de nombreux pins, notamment sur sa façade sud (figure 1). Mais seules les communes de Saran (au nord-ouest) et de Saint-Jean-de-Braye (au sud-est), situées également à l'interface de milieux agricoles ouverts, sont fortement infestées, tandis que Fleury-les-Aubrais l'est plus faiblement, tout comme Orléans. Avant de pouvoir conclure à des différences d'infestation dues à des différences environnementales et paysagères, il serait nécessaire d'intégrer dans nos analyses les éventuelles différences en matière de méthodes de lutte pratiquées, non seulement sur le domaine public, mais aussi sur le domaine privé qui représente la très grande majorité des arbres (Rousselet *et al.*, 2013). Les analyses ultérieures de ce jeu de données intégreront non seulement les données d'inventaire des arbres hors forêt en milieu urbain mais également les parcelles forestières présentes sur le territoire de ces communes. A partir de ce jeu de données exhaustif, il serait ensuite nécessaire de définir un plan d'échantillonnage pluri-annuel permettant de vérifier si ces patrons spatiaux sont stables ou non au cours du temps. Si tel était le cas, la recherche de relations entre la distribution spatiale des

infestations et la structure de l'environnement urbain à l'échelle de l'agglomération pourrait se révéler une démarche prometteuse en matière de prédiction des risques, voire de définition de méthodes de gestion.

Notre étude, réalisée en milieu urbain, confirme l'ordre de préférences de la processionnaire du pin pour les différentes essences hôtes (figure 3), précédemment établi en milieu forestier (Huchon & Démolin, 1970 ; Montoya, 181 ; Roques, 2015). Par ailleurs, le fait que plus un arbre est grand plus il a de risques d'être infesté (figure 5a) apparaît cohérent notamment avec l'effet silhouette décrit par Démolin (1969). Nos résultats mettent en lumière des niveaux d'infestation variables en fonction des essences, des caractéristiques de l'arbre et de leur localisation au sein de la ville, et ils posent la question de l'influence du contexte paysager en matière d'assemblage d'arbres-hôtes sur le niveau d'infestation locale. L'analyse de voisinage réalisée pour les arbres appartenant à l'espèce *Pinus nigra* indique une baisse du niveau d'infestation avec l'augmentation de la richesse locale en arbres-hôtes. Ce résultat, qui pourrait indiquer un effet bénéfique de la diversité, encourage à aller plus loin dans l'exploration de cette piste. Mais de nombreux facteurs confondants potentiels interdisent d'avancer des conclusions à ce stade de notre travail. Nos résultats montrent également que l'importance des attaques sur *Pinus nigra*, qui est l'essence préférée, diminue avec la densité dans le voisinage d'espèces à fort potentiel d'infestation. Ceci suggère que les attaques de processionnaire sont « diluées » dans les zones de plus forte densité en arbres favorables à l'insecte. Si richesse spécifique et densité sont des variables corrélées, il est possible que l'effet bénéfique de la richesse spécifique ne soit qu'apparent et qu'en réalité on observe un effet de la densité. De futures expérimentations seront nécessaires pour tester explicitement ces relations.

L'approche présentée ici a principalement pour objectif d'illustrer l'intérêt à poursuivre ce type d'investigations qui pourraient potentiellement offrir des perspectives de méthodes de gestion alternatives de cette espèce intégrant dans le futur la dimension paysagère. Dans un premier temps, il sera intéressant d'explorer les relations observées ici en utilisant différentes tailles de voisinage, en ciblant différentes essences, notamment d'appétence différente, d'inclure les arbres non-hôtes dans nos analyses, et de répéter le travail dans le temps pour s'assurer de la stabilité des relations observées.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien financier de la Région Centre (projet ADRIEN) et du méta-programme INRA SMaCH - Sustainable Management of Crop Health (projet SESAME). Les auteurs remercient vivement les collectivités territoriales partenaires de ces projets, à savoir les villes de Fleury-les-Aubrais, Saint-Jean-de-Braye, Saran et la communauté d'agglomération d'Orléans Val de Loire (et en particulier Bernard Chevallier, Gérard Marcolin, Jean-Pierre Orange et Philippe Rota), ainsi que les membres du comité de pilotage, la ville d'Orléans, le CRPF d'Ile-de-France et du Centre et Arbocentre (en particulier Bernard Fleury, Hervé Mifsud, Eric Sevrin et Eric de la Rochère). Nous remercions également Christelle Robinet, Francis Goussard, Alain Roques (INRA-URZF), Brigitte Musch (CGAF ONF), Stéphanie Bankhead-Dronnet (LBLGC, Université d'Orléans), Sébastien Lehmann, Catherine Pasquier (INRA US Infosol), Marie Berteloot et Arnaud Dowkiw (INRA UR AGPF) pour leur aide apportée à divers niveaux de la réalisation de ce travail. Le contenu de cette publication n'engage que la responsabilité de ses auteurs et ne reflète pas nécessairement les opinions et la politique des organismes ayant soutenu la réalisation de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- Amouroux V., 2013. La chenille processionnaire du pin. In : *Les conquérants*, DVD/VOD. Arte / Zed, Paris, 43 min.
- Bergès L., Roche P., Avon C., 2010. Corridors écologiques et conservation de la biodiversité, intérêts et limites pour la mise en place de la Trame Verte et Bleue. *Sciences, Eaux et Territoires*, 3, 34-39.
- Clergeau P., Blanc N., 2013. *Trames vertes urbaines*. Edition Le moniteur. Paris, 339 p.
- McDonnell M. J., Hahs A. K., Breuste J. H., 2009. *Ecology of cities and towns: a comparative approach*. Cambridge University Press, Cambridge, 746 p.
- Dehnen-Schmutz K., Holdenrieder O., Jeger M. J., Pautasso M., 2010. Structural change in the international horticultural industry: Some implications for plant health. *Scientia Horticulturae*, 125, 1-15.

- Dehnen-Schmutz K., Touza J., Perrings C., Williamson M., 2007. A century of the ornamental plant trade and its impact on invasion success. *Diversity and Distributions*, 13, 527-534
- Démolin G., 1969. Comportement des adultes de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Dispersion spatiale, importance écologique. *Annales des Sciences Forestières*, 1, 81-102.
- Fortel L., Henry M., Guilbaud L., Guirao A.L., Kuhlmann M., Mouret H., Rollin O. & Vaissière B.E., 2014. Decreasing abundance, increasing diversity and changing structure of the wild bee community (Hymenoptera: Anthophila) along an urbanization gradient. *PLoS ONE* 9(8): e104679. doi:10.1371/journal.pone.0104679
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press.
- Huchon H., Démolin G., 1970. La bioécologie de la processionnaire du pin. Dispersion potentielle — dispersion actuelle. *Revue Forestière Française*, N° spécial La lutte biologique en forêt, 220-234.
- Martinez M., Germain J.-F., Streito J.-C., 2014. Actualités entomologiques : nouveaux insectes ravageurs introduits en France métropolitaine (Période juillet 2005 à juin 2014). *AFPP – actes du colloque ravageurs et insectes invasifs et émergents*, Montpellier, 21 octobre 2014.
- Hóðar J. A., Zamora R., Castro J., 2002. Host utilization by moth and larval survival of pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* in relation to food quality in three *Pinus* species. *Ecological Entomology*, 27, 292-301.
- Moneo I., Battisti A., Dufour B., García-Ortiz J.C., González-Muñoz M., Moutou F., Paolucci P., Toffolo E. P., Rivière J., Rodríguez-Mahillo A.-I., Roques A., Roques L., Vega J. M., Vega J., 2015. Medical and veterinary impact of the urticating processionary larvae. In : Roques A., *Processionary moths and climate change: an update*. Springer / Quae Editions, 359-410.
- Montoya R., 1981. La procesionaria del pino. *Plagas de Insectos en las Masas Forestales Españolas*. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.
- Nageleisen L.-M., Piou P., Saintonge F.-X., Riou-Nivert P., 2010. *La santé des Forêts : Maladies, insectes, accidents climatiques ... ; Diagnostics et prévention*. Département de la Santé des Forêts / Institut pour le Développement Forestier, Paris, 608 p.
- Pautasso M., Dehnen-Schmutz K., Holdenrieger O., Pietravalle S., Salama N., Jeger M. J., Lange E., Hehl-Lange S., 2010. Plant health and global change – some implications for landscape management. *Biological reviews*, 85, 729-755.
- Pysek P., Bacher S., Chytrý M., Jarosik V., Wild J., Celesti-Grapo L., Gasso N., Kenis M., Lambdon P.W., Nentwig W., Pergl J., Roques A., Sadlo J., Solarz W., Vila M., Hulme P.E. 2010. Contrasting patterns in the invasions of European terrestrial and freshwater habitats by alien plants, insects and vertebrates; *Global Ecology and Biogeography*, 19, 317-331.
- Robinet C., Imbert C.-E., Rousselet J., Sauvard D., Garcia J., Goussard F., Roques A., 2012 - Human-mediated long-distance jumps of the pine processionary moth in Europe. *Biological invasions*, 14, 1557-1569
- Roques A., 2015. *Processionary moths and climate change: an update*. Springer / Quae Editions, 427 p.
- Rossi J.-P., Garcia J., Rousselet J., 2013. Prendre en compte les arbres ornementaux pour mieux comprendre la perméabilité des paysages à la dispersion des ravageurs : le cas des arbres hors forêt et de la chenille processionnaire du pin. *AFPP – actes de la 3^{ème} conférence sur l'entretien des espaces verts, jardins, gazons, forêts, zones aquatiques et autres zones non agricoles*, Toulouse, 15-17 octobre 2013.
- Rousselet J., Imbault V., Garcia J., Lamant T., Robinet C., Roques A., Dowkiw A., Rossi J.-P., 2013. Inventaire des arbres-hôtes de la processionnaire du pin à l'interface ville-forêt-champs. *AFPP – actes de la 3^{ème} conférence sur l'entretien des espaces verts, jardins, gazons, forêts, zones aquatiques et autres zones non agricoles*, Toulouse, 15-17 octobre 2013.
- Rusch A., 2010. *Analyse des déterminants des attaques de Melithes aeneus (Coleoptera, Nitidulidae) et de sa régulation biologique à l'échelle d'un paysage agricole : contribution à l'amélioration de la protection intégrée du colza*. Thèse, AgroParisTech, 186 p.
- Säumel I., Kowarik I. 2010 - Urban rivers as dispersal corridors for primarily wind-dispersed invasive tree species. *Landscape and Urban Planning*, 94, 244-249.
- Smith R.M., Baker R.H.A., Malumphy C.P., Hockland S., Hammon R.P., Ostojá-Starzewski J.C., Collins, D.W., 2007. Recent non-native invertebrate plant pest establishments in Great Britain: origins, pathways, and trends. *Agricultural and Forest Entomology*, 9, 307-326.
- Sordello R., Herard K., Coste S., Conruyt-Rogéon G., Touroult J., 2014. *Le changement climatique et les réseaux écologiques. Point sur la connaissance et pistes de développement*. Rapport MNHN-SPN, 178 p.
- Tubby K. V., Webber J. F., 2010. Pests and diseases threatening urban trees under a changing climate. *Forestry*, 83.
- Tyrvalainen L., Pauleit S., Seeland K., de Vries S., 2005. Benefits and uses of urban forests and trees. In: Konijnendijk C. C., Nilsson K., Randrup T. B. *Urban forests and trees: a Reference Book*. Springer, Berlin, 81-114