

« Unité de Recherche de Zoologie Forestière » (URZF), INRAE, Ardon

L'Unité de Recherche de Zoologie Forestière (URZF) d'Orléans est une unité de recherche de l'INRAE (UR633), créée en 1975, et comprenant un total de 12 personnels permanents, dont 6 chercheurs, 4 ingénieurs et assistants-ingénieurs et 2 techniciens. Si l'on prend en compte le personnel non titulaire, chercheurs invités, doctorants, post-doctorants, stagiaires temporaires et fonctions mutualisées, son effectif avoisine le plus souvent les 15 à 20 personnes. Elle fait partie du centre INRAE Val de Loire et est implantée à Ardon dans une zone forestière propice au développement d'expérimentations de plein champ. Au niveau national, elle entretient des liens forts avec le réseau des entomologistes forestiers (Montpellier, Avignon, Bordeaux) du département INRAE ECODIV « Écologie et biodiversité des milieux forestiers, prairiaux et aquatiques » auquel elle est rattachée.



L'URZF réunit des compétences en entomologie, écologie, biologie moléculaire et modélisation pour étudier les réponses des insectes aux changements globaux dans des environnements forestiers mais aussi non forestiers de plus en plus perméables entre eux. Les recherches se concentrent en particulier (i) sur l'expansion des populations d'insectes indigènes en lien avec le changement climatique et (ii) sur la mondialisation qui favorise la dispersion et l'établissement d'espèces exotiques envahissantes. Nos travaux pluridisciplinaires sont conduits dans des milieux avec différents niveaux d'anthropisation prenant en compte l'effet de la modification des habitats sur les risques encourus par diverses communautés biologiques et territoires à être envahis. Dans ce contexte, nos deux axes principaux s'articulent autour d'un troisième volet transversal qui examine la porosité croissante entre compartiments forestiers et urbains, facteur clé dans la circulation des insectes ravageurs. Nous contribuons ainsi au développement d'outils opérationnels pour aider à la gestion des impacts écologiques, économiques et sanitaires des organismes étudiés. Par ailleurs, l'unité est fortement investie dans l'interface science-société, avec une reconnaissance de ses travaux par les acteurs socio-économiques de son domaine. Elle assure une diffusion active de ses résultats, tant auprès du grand public que des gestionnaires.

① *Un volet « invasions biologiques »*

• Mondialisation et échanges internationaux

Depuis le début du XXe siècle, l'introduction d'espèces exotiques, notamment d'insectes, sur de nouveaux continents connaît une croissance exponentielle sans signe de saturation. Ces introductions sont majoritairement accidentelles

(>90 %) et liées aux activités humaines, en particulier à l'intensification des échanges commerciaux qui facilitent le transport d'espèces. Après introduction et établissement dans leur nouvel environnement, une fraction de ces espèces se propage avec des impacts écologiques, sanitaires ou économiques, et sont dési-

gnées sous le terme d'« espèce invasive » ou « espèce exotique envahissante (EEE) ». Combinées aux changements d'usage des sols, aux modifications d'habitats et au changement climatique, les invasions biologiques constituent aujourd'hui une cause majeure d'érosion de la biodiversité. La « biologie des invasions » est devenue une discipline à part entière dans laquelle on cherche à identifier les traits favorisant l'« invasivité » des espèces, les facteurs d'« invasibilité » des écosystèmes, ainsi que les principales routes d'introduction, dans une perspective de compréhension et de prévention des invasions futures.

• Les atouts de l'unité dans ce domaine

L'URZF mobilise des compétences pluridisciplinaires et dispose d'infrastructures adaptées à la recherche expérimentale, incluant un laboratoire de quarantaine pour les expérimentations en conditions contrôlées, une pépinière accueillant des essences exotiques, un laboratoire de biologie moléculaire, ainsi que des moyens techniques et logistiques pour le travail de terrain. Ces atouts lui ont permis de participer à la plupart des projets européens sur les thématiques de l'invasion depuis le début des années 2000, ainsi qu'à de nombreux articles et ouvrages de synthèse. La Chine étant considérée comme la principale source d'espèces invasives en Europe, l'URZF s'est associée en 2018 avec le Beijing Key Laboratory of Forest Pest Control de l'Université Forestière de Pékin (BFU) en Chine, pour créer le LIA (laboratoire international associé) IFOPE (Joint laboratory on Invasive FOrest Pests in Eurasia), sur l'étude conjointe des mécanismes sous-tendant la survenue accélérée des invasions d'insectes en Europe et en Asie.

• De la forêt à l'arbre d'ornement et à son commerce

Concernant les insectes phytophages exotiques, en particulier les espèces forestières phyllophages, séminiphages et xylophages étudiées par l'unité, le commerce de plantes ornementales constitue aujourd'hui la principale voie d'introduction d'espèces invasives. Initialement centrée sur les milieux forestiers, l'URZF élargit désormais ses travaux aux environnements urbains intégrant les arbres d'ornement. Sur certains de nos modèles d'études comme la

punaise américaine (*Leptoglossus occidentalis*), la pyrale du buis (*Cydalima perspectalis*), ou le scolyte asiatique (*Xylosandrus crassiusculus*), les analyses génétiques des routes d'invasion ont mis en évidence des effets de type tête de pont, où un foyer initial agit comme source secondaire d'invasion vers d'autres régions. L'intensification des échanges commerciaux, non seulement inter-continentaux mais aussi intra-continentaux, et l'évolution structurelle du secteur horticole (offre et demande) favorisent la propagation. Ce schéma reflète l'impact majeur de la mondialisation.

• Prévenir plutôt que guérir

Dans ce contexte, nous développons depuis le milieu des années 2010 des dispositifs de surveillance reposant sur deux approches complémentaires de détection précoce ciblées sur des groupes à fort potentiel invasif. Le développement de cette stratégie visant à renforcer les actions d'anticipation et de prévention se fait à travers deux approches:

(i) La mise en place de plantations sentinelles (**Figure 1**) dans une région identifiée comme source possible (« région-source ») d'espèces envahissantes pour une région potentiellement réceptrice (« région d'introduction »), en raison des échanges commerciaux majeurs qu'elles entretiennent, notamment dans le commerce des plantes ou de leurs dérivés (bois par exemple). Ces dispositifs ont pour but d'observer sans a priori la capacité de colonisation et l'effet potentiel des bioagresseurs exotiques sur des hôtes autochtones, ou bien de détecter les insectes pouvant être introduits avec leur plantes-hôtes lors de leur exportation.

(ii) L'installation de réseaux de pièges multi-composés dans les ports d'entrées éventuels (ports, aéroports, zones de transit et de stockage, etc.) et les forêts avoisinantes. Cette approche est expérimentée sur les xylophages exotiques des ligneux. Les pièges appâtés avec des attractifs à vocation générique ciblent un large spectre d'espèces de ce groupe majeur, connues ou non. Le déploiement d'expérimentations à l'échelle mondiale a montré une attractivité bien conservée au sein des genres, tribus, voire sous-familles, ce qui signifie que la phéromone d'un insecte européen pourrait être attractive pour un insecte chinois ou américain du même genre, et que cette approche

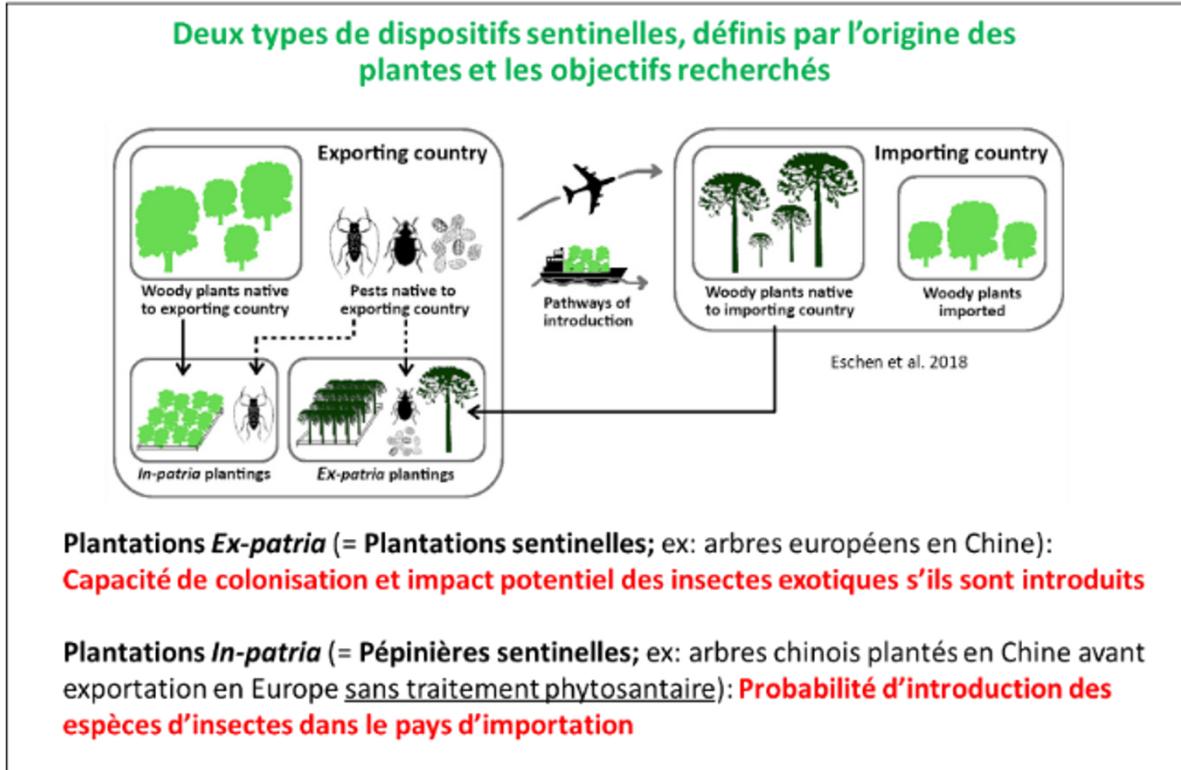


Figure 1 : Concept des plantations sentinelles, au cœur des approches sur la détection a priori et précoce (d'après Eschen et al., 2018)

représente un outil pertinent pour la détection précoce des espèces envahissantes à l'arrivée. À terme, ces protocoles de surveillance ont voca-

tion à être déployés de manière opérationnelle par les gestionnaires en lien avec la DGAL du Ministère en charge de l'agriculture.

② Un volet « réponse des organismes au changement climatique »

Le changement climatique se caractérise à la fois par une augmentation de la moyenne des températures globales mais aussi par des événements climatiques de plus en plus extrêmes, entraînant des bouleversements profonds notamment chez les plantes et les animaux ectothermes, par exemple sur leur cycle phénologique ou leur distribution. Le lien de cause à effet est toutefois rarement démontré dans un contexte de changements globaux qui dépassent largement le changement climatique.

- **La processionnaire du pin : un modèle biologique de choix**

Nous étudions principalement la processionnaire du pin, insecte d'origine méditerranéenne, pour répondre à ces questions avec une approche pluridisciplinaire. Cet insecte est une espèce présentant plusieurs avantages : (i) des données historiques sont disponibles car ses larves défoliatrices et urticantes impactent non seulement les arbres, mais aussi la santé humaine et animale, et font l'objet de surveillance et de recherches depuis des décennies ; et (ii) les larves sont grégaires et tissent des nids en forme de grosses boules blanches facilement

détectables dans les arbres, rendant l'espèce facilement cartographiable à large échelle. Les gestionnaires, collectivités territoriales, agences régionales de santé, et organismes de défense contre les espèces nuisibles s'intéressent de plus en plus à la processionnaire, qui est aujourd'hui autant urbaine que forestière. De plus, l'inscription de la processionnaire du pin au code de la santé publique depuis 2022 se traduit par de plus en plus d'arrêtés préfectoraux de lutte obligatoire. Pour répondre aux demandes croissantes d'études sur les insectes urticants, l'unité s'est dotée en 2025 d'un laboratoire dénommé URTILAB, unique en Europe, lui permettant

d'augmenter ses capacités expérimentales en conditions de sécurité pour ses agents.

- **Une expansion expliquée par le réchauffement climatique et modulée par le paysage**

Nous avons suivi l'évolution spatiale de son aire de répartition à l'échelle nationale tous les 5 ans selon une méthode standardisée (**Figure 2**). Le front de colonisation a même été enregistré en 2011 à l'échelle du continent, de l'Atlantique à la Mer Noire grâce au réseau euro-méditerranéen PCLIM coordonné par l'unité.

À l'aide d'approches mêlant expériences de terrain et de laboratoire en France, nous avons pu montrer avec nos partenaires européens l'existence d'une relation directe entre

l'augmentation des températures minimales d'octobre à mars et l'expansion de son aire de répartition en région Centre Val de Loire et dans les Alpes, via la physiologie de l'insecte et les températures requises pour son alimentation et sa survie. Le recours aux outils et aux concepts de la génétique des populations a également permis de valider le modèle de dispersion des adultes ailés utilisé, en plus des paramètres de survie, pour la modélisation mathématique de l'expansion. L'évolution de l'aire de distribution de cette espèce est pour cette raison devenue un des premiers indicateurs de l'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) et a été citée dans le rapport du GIEC de 2007 sur l'évaluation des changements

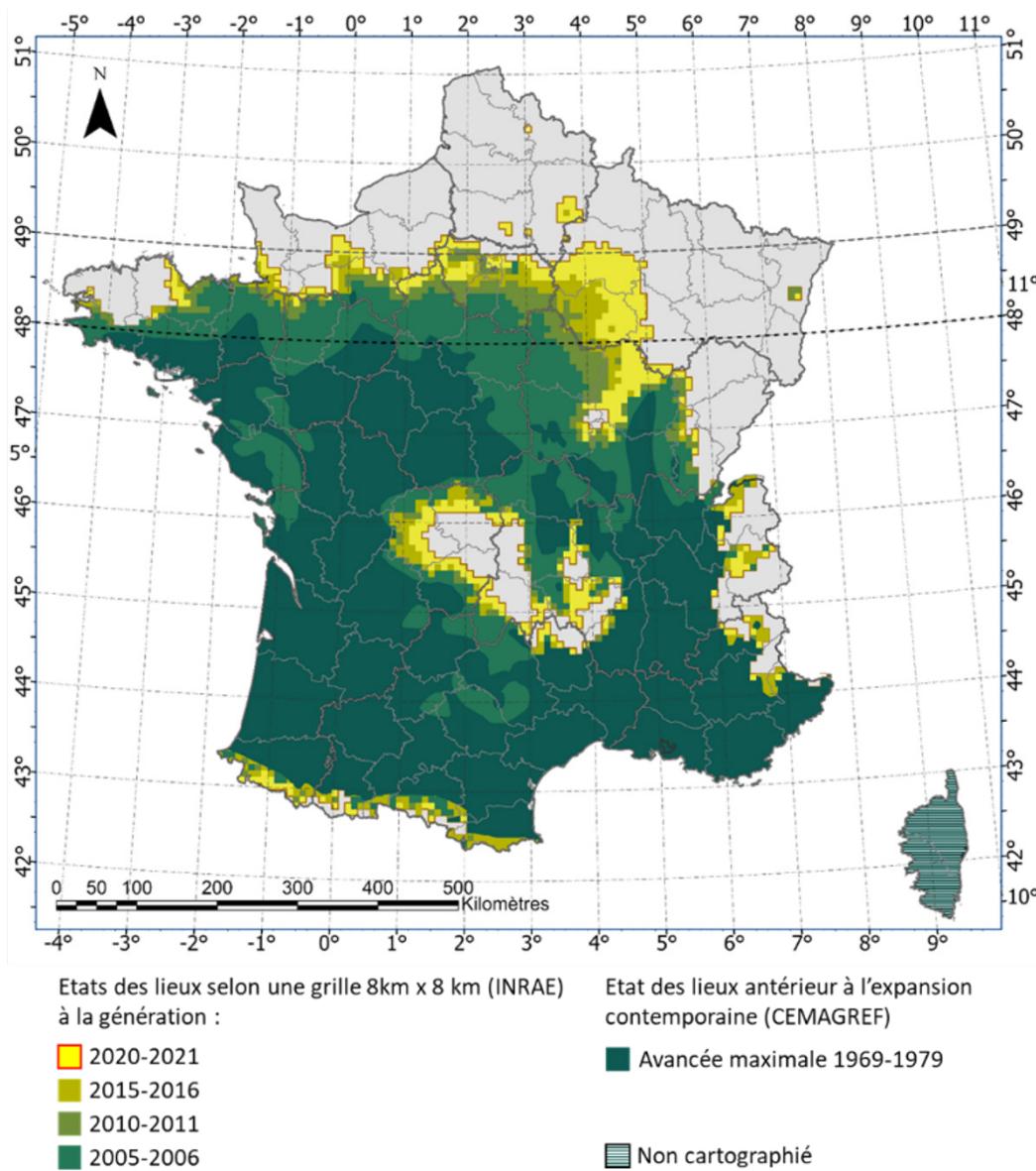


Figure 2 : Évolution de l'aire de distribution de la processionnaire du pin en France de 1979 à 2021 (d'après Robinet et al. 2025).

et des réponses dans les systèmes naturels et gérés. Nous avons également pu démêler les rôles respectifs de l'évolution du climat et des paysages. Alors que le climat était le facteur limitant l'expansion jusqu'au début des années 1990, la ressource en plante-hôte, variant dans l'espace, s'est avérée être capable de moduler la vitesse d'expansion selon les territoires et de fournir des pistes de gestion paysagère.

Un ouvrage de synthèse coordonné par l'URZF et associant 101 auteurs de 22 pays a été publié en 2015.

- **Une phénologie qui commence à être perturbée par le dérèglement climatique**

L'augmentation moyenne des températures s'accompagne aussi de vagues de chaleur estivales ou automnales. La processionnaire du pin répond à ce type de changement, pas seulement par une modification de sa répartition spatiale, mais aussi par une évolution temporelle de son cycle biologique (phénologie) au cours de l'année. Connue pour varier géographiquement en fonction des contraintes climatiques, la phénologie semble évoluer localement et apparaît de plus en plus variable entre années. Ce phénomène se traduit par une imprévisibilité et un allongement des périodes à risques sanitaires, et

une difficulté croissante à mettre en œuvre les méthodes de lutte qui ciblent un stade de développement précis. Le modèle phénologique que nous avons développé, calibré par des expérimentations en laboratoire et validé par des observations terrain, montre que nous ne sommes encore qu'au tout début des changements de phénologie attendus. Pour toutes ces raisons, nous avons créé Urtiquand, un réseau de suivi participatif de la phénologie de la processionnaire du pin qui permettra de mesurer ces changements à large échelle.

- **La réponse d'une espèce est un compromis entre plusieurs contraintes**

La plupart des études se concentre sur l'effet de contraintes climatiques à un stade donné sans considérer les effets en cascade sur les autres stades et ni les effets non-additifs. Or, si un décalage phénologique peut atténuer une contrainte à un stade donné, il engendre des compromis à l'échelle du cycle complet, limitant le champ des réponses possibles. La distribution spatiale est probablement elle-même contrainte par la réponse phénologique. Cette problématique complexe, déjà amorcée, constitue un axe de recherche que nous poursuivrons.

3 Des concepts et approches à l'interface des deux axes thématiques

Les phénomènes d'invasion biologique et d'expansion de l'aire d'espèces natives partagent des mécanismes communs, mais se distinguent aussi par certaines spécificités, qui rendent leur étude conjointe complémentaire et pertinente pour nos thématiques. L'étape d'expansion géographique dépend du franchissement non seulement de la barrière à la dispersion, mais aussi de la barrière environnementale (Figure 3) qui traduit la dissimilarité croissante des conditions à mesure qu'une espèce s'éloigne de sa zone source. Les étapes de transport et d'introduction, spécifiques au processus d'invasion, ne sélectionnent qu'un faible pool de propagules dans l'aire d'origine, réduisant les flux et la diversité génétique ainsi que la diversité des ennemis naturels, à l'inverse des expansions d'espèces natives puisqu'une continuité spatiale est attendue entre les populations historiques et les populations pionnières.

- **Perméabilité entre compartiments et dispersion assistée**

Les insectes en expansion, qu'ils soient exotiques ou natifs, peuvent répondre de manière analogue à des processus ou contraintes écologiques semblables, dont la capacité ou non à établir des populations dans des compartiments contrastés mais perméables, ou à les traverser

de manière transitoire. Il est donc crucial de comprendre ces processus qui jouent un rôle majeur dans leur aptitude à se propager et dans leurs impacts écologiques ou sanitaires. En effet, la colonisation de nouveaux environnements forestiers par ces espèces passe souvent par l'établissement de populations ou à minima la survie temporaire dans les compartiments qui

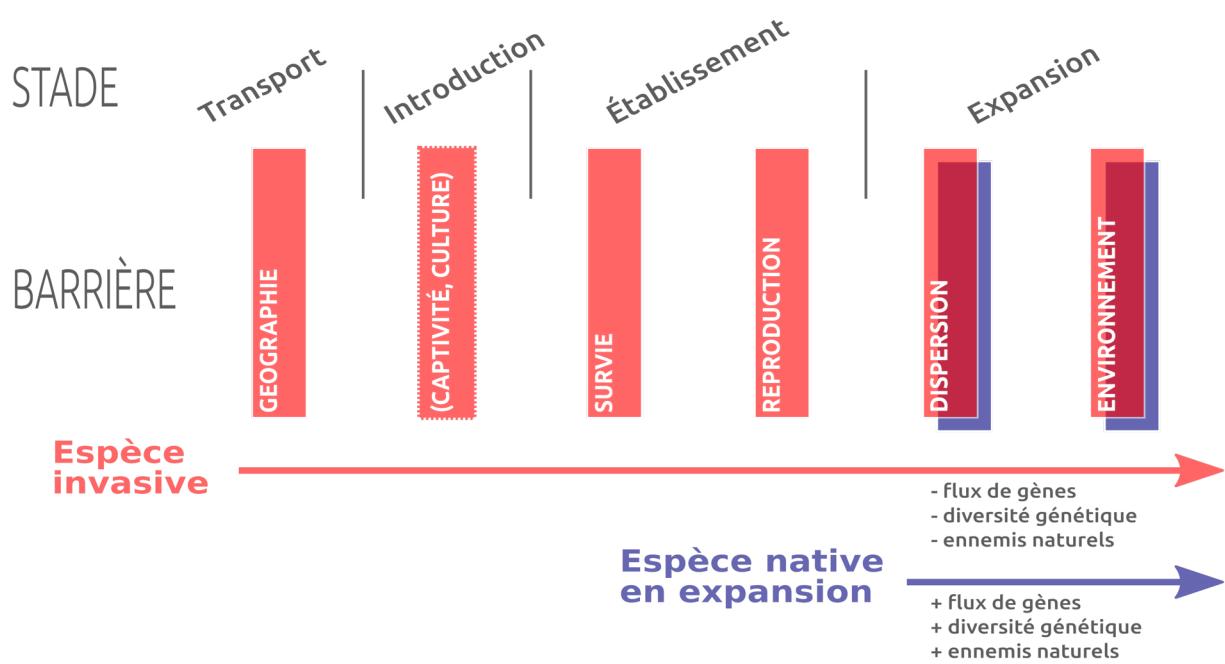


Figure 3 : Étapes clés et barrières dans les processus d'invasion biologique d'une espèce exotique (rouge) et d'expansion de l'aire d'une espèce native (violet), adapté du cadre unifié des invasions biologiques (d'après Renault et al. 2018).

jouxtent les forêts et fragmentent le paysage à plus large échelle. Ainsi, la processionnaire du pin est très présente en zones urbanisées, où de forts niveaux d'attaque peuvent être observés sur arbres ornementaux, et où la densité et la proximité des populations humaines aboutit à des risques sanitaires plus importants encore qu'en forêt. Les espèces exotiques, quant à elles, sont de fait introduites par les activités humaines, et transitent le plus souvent par des habitats fortement anthropisés tels que les zones d'échanges commerciaux (ports, aéroports, marchés, etc.) et les habitats alentours. Il convient ainsi d'appréhender dans nos approches les gradients de niveau d'anthropisation.

La dispersion des espèces exotiques comme des espèces natives peut également être assistée de manière directe (transport accidentel d'individus) ou indirecte (aménagement de voies de colonisation privilégiées ou refuges). Ainsi, nous intégrons à nos réflexions des facteurs tels que le commerce ornemental, dont on a démontré le rôle essentiel dans les invasions fulgurantes (e.g. pyrale du buis). La transplantation de pins est également considérée responsable de l'établissement de populations pionnières de processionnaire du pin, déconnectées de l'avancée générale du front de colonisation, et se rapprochant à ce titre de cas d'invasions biologiques. Plus généralement, la structure du

paysage à différentes échelles (choix ornamentaux en zones résidentielles, parcs et aménagements en ville, linéaires boisés le long de grands axes routiers, ou encore présence ou absence de massifs forestiers) a également un impact significatif sur les patrons et vitesses d'expansion. Enfin, le succès d'une espèce à établir de nouvelles populations et étendre son aire de répartition dans de nouvelles zones dépend de l'adéquation entre les traits des individus (composante « invasivité ») et la susceptibilité de l'environnement receveur à la pénétration de nouveaux organismes (composante « invasibilité »). L'URZF s'est longtemps focalisée sur la composante invasivité, mais nous intégrons désormais la caractérisation des communautés receveuses. Cette facette supplémentaire contribue à caractériser des compartiments plus ou moins contrastés, et ainsi mieux évaluer leur perméabilité à de nouveaux organismes.

• Instrumentation et nouveaux outils de détection

L'unité s'est rapidement positionnée sur l'emploi de nouvelles technologies pour pérenniser, standardiser, et massifier l'acquisition de données de terrain qui font une de ses forces depuis longtemps. Ainsi, pour augmenter à la fois la résolution temporelle et l'échelle spatiale de nos échantillonnages, nous avons participé à

l'évaluation en conditions réelles voire au développement d'instruments connectés avec différentes entreprises.

Nous gérons un parc de pièges phéromonaux capables de compter les individus capturés et télétransmettre les données, que nous utilisons principalement pour suivre les populations de processionnaire du pin et accéder dorénavant à des données suffisamment résolutives pour étudier sa phénologie. Nous participons également au développement de pièges à interception, qui photographient les insectes capturés et transmettent les images vers des serveurs où des algorithmes d'identification taxonomique par intelligence artificielle sont exécutés. Cette surveillance automatisée peut être employée à la fois pour la détection précoce d'espèces exotiques ou le suivi de communautés natives. Dans la littérature, le microclimat

est décrit comme essentiel pour comprendre les réponses des insectes, mais sous-étudié en raison de la difficulté à répliquer les mesures à une échelle suffisamment fine. Dans ce cadre, l'unité est impliquée dans le prototypage de solutions modulaires, à bas coût, et open source quand c'est possible, pour collecter et télétransmettre des données multicapteurs.

Enfin, nous utilisons des outils moléculaires de type barcoding qui permettent l'identification d'espèces ou de groupes d'espèces à partir de bases internationales de référence. Ces méthodes s'appliquent aussi bien aux espèces exotiques ou émergentes capturées dans nos réseaux de pièges qu'aux espèces qui composent les communautés natives et peuvent participer à la résistance à de nouveaux organismes envahissants, natifs ou exotiques.

D'un point de vue plus général, l'URZF poursuivra l'étude des insectes forestiers par des approches pluridisciplinaires à plusieurs échelles spatiotemporelles dans le contexte de la perméabilité des compartiments

Bibliographie

R. Eschen, R. O'Hanlon, A. Santini, A. Vannini, A. Roques, N. Kirichenko & M. Kenis. Safeguarding global plant health: the rise of sentinels. *Journal of Pest Science*, **2018**, 92, 29–36.

<https://doi.org/10.1007/s10340-018-1041-6>

C. Robinet, F.-X. Saintonge, X. Tassus, S. Brault. Invasion et expansion d'insectes bioagresseurs forestiers. Quæ (1^{ère} édition, **2025**).
<http://doi.org/10.35690/978-2-7592-4048-7>

Processionary Moths and Climate Change : An Update. eBook edited by A. Roques
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-9340-7>

D. Renault, M. Laparie, S.J. McCauley and D. Bonte. Environmental Adaptations, Ecological Filtering, and Dispersal Central to Insect Invasions. *Annual Review of Entomology*, 2018, **63**: 345-368.
<https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043315>



Contacts :

Marie-Anne Auger-Rozenberg (Directrice) et **Christelle Robinet** (Directrice adjointe)
URZF, Centre INRAE Val de Loire, site d'Ardon (45)
orl-zool-codir@inrae.fr
<https://urzf.val-de-loire.hub.inrae.fr/>