

Plan de rapport final d'un projet de recherche financé dans le cadre du plan Écophyto II+

Remarques concernant ce document

- La mise en forme de ce rapport, hormis sa partie scientifique et les annexes, doit être respectée. Ce format imposé permettra au service de la recherche une copie automatique vers d'autres documents à usage interne ou externe.
- Tous les fichiers doivent être déposés en 2 formats : au format PDF et dans des formats éditables (DOC, ODT, RTF, XLS, ODS, etc.) pour les besoins du co-pilotage de l'axe recherche et innovation. Le rapport doit être envoyé à l'équipe animation (animation-ecophyto@inrae.fr) avec copie aux copilotes ministériels (antoine.legal@agriculture.gouv.fr, manon.michaut@agriculture.gouv.fr, marie-camille.soulard@developpement-durable.gouv.fr), et à l'OFB (ecophyto@ofb.gouv.fr) en indiquant en objet l'acronyme de votre projet.
- Un envoi sous forme électronique suffit dans un premier temps.
- Les documents de ce rapport, en dehors de l'éventuelle partie confidentielle, serviront aussi bien pour l'évaluation finale du projet que pour la valorisation des résultats.
- Les versions électroniques des résumés et de la synthèse de votre rapport doivent impérativement nous parvenir sous format modifiable afin de pouvoir être réutilisés pour valorisation ou publiés (après relecture de votre part), ainsi que sous format PDF.



BioIndicFin

« Mise en place de bioindicateurs fins de la qualité de l'environnement grâce à un auxiliaire commun des vergers »

« Améliorer les connaissances et les outils pour demain et encourager la recherche et l'innovation - thèses »

Rapport final Vn [Lécureuil C & Meunier J]

Date de la version du rapport : 30/08/2025

Coordonnées du laboratoire

IRBI (Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte)

UMR CNRS 7261 & Université de Tours

<https://irbi.univ-tours.fr/>

Identité et coordinateur du projet de recherche (adresse et courriel)

Lécureuil Charlotte et Meunier Joël

IRBI

Parc de Grammont

37200 Tours

charlotte.lecureuil@univ-tours.fr et joel.meunier@univ-tours.fr

Action pilotée par les Ministères chargés de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche (MTEBFMP), de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA), du Travail, de la Santé, des Solidarités et des Familles (MTSSF), et de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (MENESR) avec l'appui financier de l'Office Français pour la Biodiversité (OFB), par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au plan Écophyto II+

Table des matières

SYNTHÈSE	5
Contexte général et enjeux scientifiques et techniques	15
Objectifs généraux du projet.....	15
Quelques éléments de méthodologie (et difficultés éventuelles rencontrées)	16
Résultats obtenus	17
Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques, valorisation.....	19
Partenariats mis en place, projetés, envisagés	20
Pour en savoir plus (quelques références)	20
Liste des opérations de valorisations issues du contrat (articles de valorisation, participation à des colloques, enseignement et formation, communication, expertises...)	21
Résumés	23
RAPPORT SCIENTIFIQUE	26
Annexe : textes des publications	39

SYNTHÈSE

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

L'utilisation de produits phytosanitaires entraîne souvent **l'exposition accidentelle d'organismes vivants** qui ne sont pas les cibles visées. Longtemps considérées comme négligeables, ces expositions à faibles doses se révèlent en réalité lourdes de conséquences : de plus en plus d'études montrent qu'elles peuvent perturber la reproduction, le comportement ou la survie de ces espèces, avec des effets en cascade sur la **santé des cultures**, **l'économie agricole** et **l'équilibre écologique**. Ce constat est particulièrement préoccupant pour les insectes non-cibles, qui jouent un rôle central dans le maintien de la biodiversité et de la production agricole. En effet, certains insectes non cibles limitent naturellement les populations de ravageurs, d'autres assurent la pollinisation de nombreuses cultures, et beaucoup participent au bon fonctionnement des sols et des écosystèmes c'est ce qu'on appelle des services écosystémiques. Préserver la biodiversité est donc indispensable pour garantir la **durabilité de l'agriculture et la qualité de notre environnement**. Face à cette urgence, deux défis majeurs s'imposent. Le premier consiste à mieux comprendre la **nature et les mécanismes physiologiques des effets sublétaux** des pesticides, c'est-à-dire ces perturbations souvent invisibles qui ne provoquent pas immédiatement la mort des organismes exposés, mais compromettent à terme leur reproduction, leur comportement ou leur survie. Le second défi est de **développer des outils capables de détecter précocement ces altérations**, avant qu'elles ne se traduisent par des déclin visibles des populations ou par des pertes de services écosystémiques.

Pour répondre au premier défi, il est essentiel d'identifier l'éventail des réponses possibles qu'un organisme peut développer face aux différents types de pesticides, et de décrypter les mécanismes physiologiques qui sous-tendent leurs effets sublétaux. Cela implique de dépasser les approches classiques de toxicologie, traditionnellement centrées sur la mortalité ou la fertilité, pour explorer des processus plus subtils mais tout aussi déterminants, tels que la régulation hormonale ou l'expression de comportements clés de la biologie des espèces, à l'image des soins parentaux.

Pour répondre au second défi, le développement d'**indicateurs précoces et robustes** apparaît quant à lui comme une piste particulièrement prometteuse. Alors que les méthodes classiques reposent principalement sur l'observation de la présence ou de l'absence d'espèces sentinelles – souvent lorsque le déclin est déjà engagé – l'approche que nous proposons permet de détecter des perturbations biologiques bien avant qu'elles n'entraînent une diminution visible des populations. L'utilisation de biomarqueurs protéiques, mesurés chez des insectes auxiliaires communs et faciles à collecter, ouvre ainsi la voie à un **diagnostic rapide et fiable de l'état de santé d'un milieu**. Ces indicateurs offriraient la possibilité d'intervenir à temps pour préserver les écosystèmes, anticiper les risques pour les services qu'ils rendent et favoriser le maintien des espèces bénéfiques aux cultures, tout en accompagnant la transition vers une agriculture plus durable.

Le perce-oreille européen (*Forficula auricularia*, Fig 1) s'avère être un **candidat idéal pour développer ces outils de bioindication**. Très commun dans les vergers et jardins à travers la France, il est un prédateur efficace de ravageurs comme les pucerons ou les psylles, et joue donc un rôle direct dans la protection des cultures.

Facile à collecter, doté d'une longue durée de vie (jusqu'à 18 mois), il permet un suivi tout au long de l'année. De plus, nos récents travaux ont montré que même de très faibles doses de pesticides pouvaient perturber des fonctions biologiques essentielles chez cette espèce, comme les soins parentaux ou l'investissement reproducteur. Ces caractéristiques en font un modèle pertinent pour évaluer la santé des populations et suivre leurs réponses face aux pressions environnementales.



Fig. 1 - Femelle du perce-oreille Européen s'occupant de ses petits après l'éclosion.

Notre projet, soutenu par le plan Écophyto II+ (qui a financé 42 % du salaire de la doctorante), avait pour ambition de :

1. **Évaluer les effets sublétaux** des pesticides sur le comportement et la physiologie du perce-oreille, en conditions réalistes de terrain, afin de mesurer leur impact sur sa capacité à maintenir ses fonctions écologiques dans des milieux contaminés.
2. **Identifier des marqueurs moléculaires précoces** permettant de détecter ces perturbations avant qu'elles ne se traduisent par des effets visibles sur le comportement ou la survie, et ainsi valider l'approche bioindicatrice.

En atteignant les deux objectifs fixés, ce projet a permis d'initier le développement d'outils de bioindication innovants en lien direct avec les priorités du plan Écophyto. Les résultats obtenus ouvrent la voie à la mise à disposition de moyens pratiques et fiables pour les décideurs, gestionnaires et agriculteurs. Ces outils permettront de surveiller la qualité biologique des agroécosystèmes, de détecter rapidement les premiers signes de perturbation, d'adapter les pratiques agricoles en conséquence et, ainsi, de réduire les risques liés à l'usage des pesticides, tout en préservant les insectes auxiliaires indispensables à la durabilité des cultures. Les résultats associés à chacun de ces deux objectifs sont présentés dans les sections suivantes.

2. AXE 1 - DIVERSITE DES EFFETS SUBLETAUX CHEZ LE FORFICULE

Le premier axe de ce projet consistait à évaluer les effets dits *sublétaux* des pesticides, c'est-à-dire leurs impacts non mortels mais potentiellement perturbateurs, sur le comportement et la physiologie du perce-oreille européen. Nous disposons déjà de résultats préliminaires montrant que certains pesticides modifient fortement la biologie de cette espèce. Par exemple, nos travaux sur la **deltaméthrine** – un insecticide de la famille des pyréthrinoïdes, largement utilisé en arboriculture – ont révélé que cette molécule altère certains comportements de soins maternels tout en stimulant la reproduction des femelles (Mauduit et al., 2021; Meunier et al., 2020). À l'inverse, le **pyriproxyfène**, un insecticide qui mime l'action d'une hormone clé chez les insectes (l'hormone juvénile), n'a montré aucun effet détectable sur ces traits (Merleau et al., 2022). Dans le cadre de cette thèse, nous avons d'abord voulu compléter ces premiers résultats en menant une série d'expériences de plus grande ampleur sur une autre molécule emblématique de l'agriculture : le **glyphosate**. Contrairement à de nombreuses études antérieures, limitées à un seul sexe ou à une seule population, notre approche

a intégré à la fois les mâles et les femelles, et pris en compte la diversité naturelle d'individus issus de six populations différentes. Ce choix méthodologique visait à accroître la robustesse des conclusions et à mieux refléter la diversité biologique réelle du perce-oreille dans les agroécosystèmes.

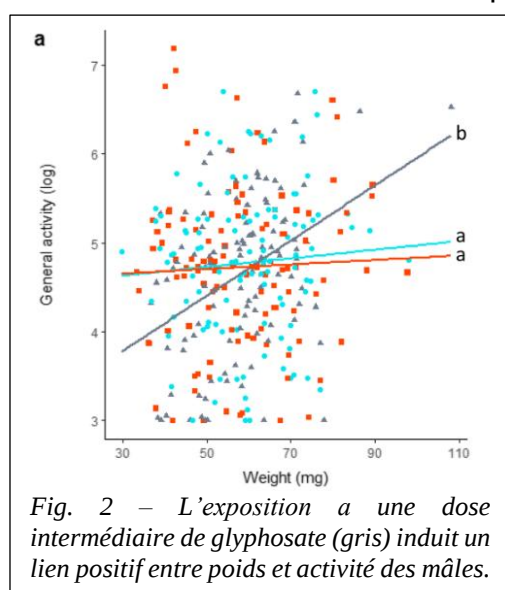
Le deuxième but de cet axe était de mieux **comprendre les mécanismes physiologiques qui régulent certains comportements essentiels** chez le perce-oreille, en particulier les **soins maternels** apportés aux œufs et aux jeunes. L'enjeu était de savoir si, et de quelle manière, l'exposition aux pesticides pouvait perturber ces comportements de façon discrète, sans entraîner la mort directe des individus. Cette démarche répond directement à la logique du plan Écophyto, qui met l'accent sur **l'anticipation des risques non intentionnels liés à l'usage des pesticides**. Pour cela, nous nous sommes intéressés au rôle de l'hormone juvénile (JH), connue pour réguler le comportement maternel chez plusieurs insectes, et dont de nombreux **pesticides dits « régulateurs de croissance » (IGR)** imitent ou bloquent l'action. Comprendre cette régulation est essentiel pour évaluer l'impact potentiel de ces pesticides IGR sur des comportements sociaux qui conditionnent la survie des jeunes et la persistance des populations. Dans cette perspective, nous avons mené une série d'expériences en manipulant directement cette hormone grâce à trois molécules : le méthoprène et le pyriproxifène, tous deux agonistes de la JH, et le précocène I, un inhibiteur de cette hormone. Cette approche expérimentale a permis de tester de manière ciblée l'influence de l'hormone juvénile sur le déclenchement et le maintien des soins maternels, et d'évaluer dans quelle mesure des pesticides IGR pourraient perturber des comportements sociaux aussi essentiels pour le succès reproducteur et la durabilité des populations.

a) Partenariats

La réussite de l'axe I a reposé sur un partenariat étroit avec le terrain agricole. Afin d'évaluer les effets sublétaux des pesticides chez le perce-oreille, nous avons sollicité la collaboration de **dix arboriculteurs et arboricultrices de la région Centre-Val de Loire**. Leur implication a été déterminante : ils nous ont ouvert l'accès à leurs vergers pour la pose de pièges et ont accepté de partager des informations détaillées sur leurs pratiques culturales et leurs usages de produits phytosanitaires. Ces exploitations présentaient par ailleurs une diversité de pratiques agricoles, allant de modes de production conventionnels à des systèmes plus intégrés, chacun suivant des cahiers des charges différents. Cette hétérogénéité constitue un atout scientifique majeur, car elle permet d'examiner les effets des pesticides dans des contextes de gestion variés, plus représentatifs de la réalité des vergers français. Grâce à cette mobilisation, nous avons pu constituer un jeu de données solide, basé sur six populations naturelles distinctes présentant un effectif suffisant pour mener des analyses comparatives. Ce partenariat illustre l'importance d'associer la recherche et les acteurs de terrain dans le cadre des politiques publiques : il permet à la fois de produire des résultats scientifiquement robustes et de garantir que ceux-ci répondent aux réalités et besoins concrets du monde agricole.

b) Résultats obtenus

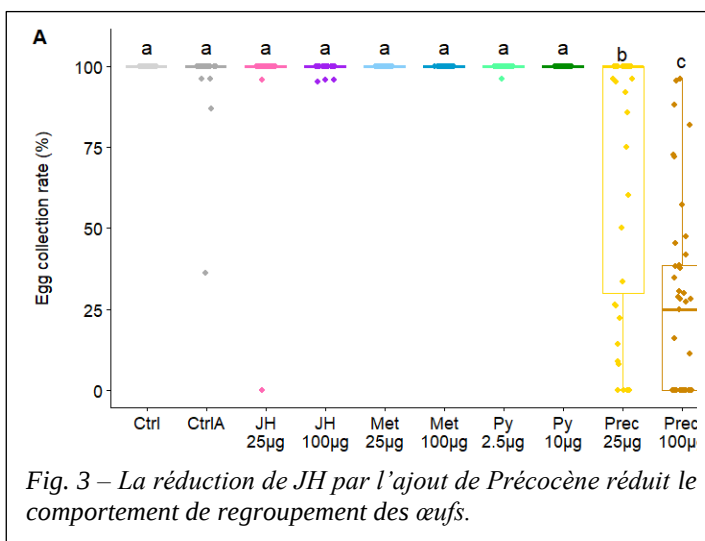
Les travaux menés dans le cadre de ce premier axe montrent qu'un herbicide à base de glyphosate exerce des effets limités mais néanmoins mesurables sur le perce-oreille européen. Chez les mâles, une exposition à de faibles doses a modifié la relation entre leur activité et leur poids (Fig. 2), sans toutefois altérer leur immunité, leur survie ou leurs comportements sociaux.



Chez les femelles et leur descendance, nous n'avons détecté aucun effet significatif sur les soins maternels, le développement ou la résistance des jeunes. Ces résultats suggèrent que, contrairement à d'autres pesticides testés auparavant, **le glyphosate n'entraîne pas de perturbations majeures des fonctions vitales étudiées chez cette espèce**. Toutefois, nos analyses révèlent également que la sensibilité au glyphosate varie selon les populations naturelles, et que ses effets diffèrent en fonction du sexe et du trait biologique considéré. Cela souligne l'importance de prendre en compte la diversité et la complexité des réponses des insectes pour mieux comprendre l'action des pesticides et leurs conséquences sur la

biodiversité. Enfin, en mettant en évidence à la fois des signes de robustesse et des points de vulnérabilité, le perce-oreille européen apparaît ainsi comme un modèle particulièrement pertinent pour étudier les effets subtils des expositions sublétales et ainsi, identifier des marqueurs moléculaires précoces permettant de détecter des perturbations avant qu'elles ne se traduisent (ou qui ne se traduisent pas) par des effets visibles sur le comportement ou la survie.

Notre deuxième série d'expériences sur l'hormone juvénile (JH) a montré que l'inhibition de cette voie réduit significativement les comportements parentaux de protection et de nettoyage des œufs, tandis qu'une augmentation artificielle de JH n'induit pas de soins chez des femelles sans expérience de ponte (Fig. 3). Ces résultats démontrent que la **JH est indispensable au maintien des soins maternels**, mais insuffisante pour en déclencher l'expression. Ils confirment ainsi que des perturbations de cette voie hormonale peuvent compromettre la survie des jeunes et, par conséquent, affecter directement les services écosystémiques rendus par ces insectes. Ces données apportent donc un éclairage essentiel sur la manière dont certains pesticides à mode d'action hormonal, tels que les IGR, pourraient altérer des comportements sociaux cruciaux pour le succès reproducteur et la durabilité des populations.



Enfin, nos travaux ont révélé de façon inattendue **l'existence de deux espèces cryptiques de perce-oreilles**, morphologiquement très proches mais caractérisées par des stratégies reproductives distinctes (Fig. 4). Certaines populations se composent exclusivement d'une espèce, tandis que d'autres hébergent les deux, parfois même au sein d'un même verger (contrairement à ce qui était jusqu'ici établi). Ces différences se traduisent par des variations marquées dans la ponte, le développement des œufs, la qualité des nymphes et les comportements maternels. Ce qui pouvait apparaître comme une simple variabilité locale entre populations reflète en réalité la coexistence de deux espèces présentant des stratégies de reproduction et de soins maternels différentes – et, par conséquent, des contributions potentiellement contrastées aux services écosystémiques dans les vergers.

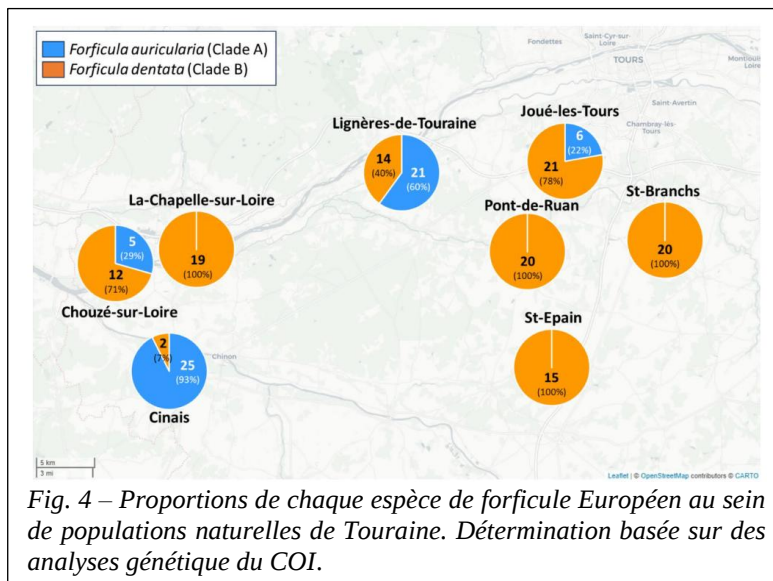


Fig. 4 – Proportions de chaque espèce de forficule Européen au sein de populations naturelles de Touraine. Détermination basée sur des analyses génétique du COI.

Globalement, les travaux de cet axe I montrent que les impacts des pesticides sur les insectes auxiliaires doivent être évalués dans un **contexte plus large que la seule toxicité aiguë**. Ils démontrent ainsi qu'il est crucial de prendre en compte :

- La **diversité biologique**, y compris la présence **d'espèces cryptiques**, qui doit être intégrée dans l'évaluation des impacts des pesticides.
- Les **effets subtils sur les comportements sociaux et reproductifs**, car ils peuvent influencer la survie et la résilience des populations d'auxiliaires.
- La combinaison de la protection des populations locales avec une compréhension fine de leur biologie et de leur diversité, afin d'envisager une gestion durable des vergers.

Ces résultats ont des implications directes pour les objectifs d'Écophyto. Ils suggèrent que la conception de pratiques agricoles durables nécessite une compréhension fine de la biologie et de la diversité des auxiliaires. Il ne suffit pas d'évaluer un pesticide sur une population standard : il faut intégrer la variabilité naturelle et la présence éventuelle d'espèces cryptiques pour protéger efficacement les insectes utiles et garantir la résilience des agroécosystèmes.

En résumé, les travaux que nous avons conduit dans le cadre de ce premier axe apportent un éclairage nouveau sur la complexité des interactions entre pesticides, diversité biologique et comportements sociaux des auxiliaires.

3. AXE 2 - RECHERCHE DE MULTI-BIOINDICATEURS D'EXPOSITION

Le deuxième axe de notre projet visait à **identifier des marqueurs moléculaires** précoces capables de détecter les perturbations induites par les pesticides avant qu'elles ne se traduisent par des effets visibles sur le comportement ou la survie – et ainsi valider l'approche bioindicatrice. En effet, il demeure aujourd'hui difficile de déterminer si un milieu est contaminé : les analyses de sols sont coûteuses, techniquement complexes et nécessitent souvent de cibler *a priori* les molécules recherchées. Pour contourner ces limites, nous avons mobilisé une approche innovante : l'**écotoxicoprotéomique**. Basée sur la spectrométrie de masse, cette méthode permet d'identifier dans le profil protéique des organismes exposés de véritables « signatures moléculaires », comparables à des empreintes invisibles révélant une contamination avant même l'apparition de conséquences phénotypiques.

Pour valider cette démarche, nous avons choisi le **perce-oreille européen** comme organisme modèle (en continuité avec les résultats de l'axe I) et la **deltaméthrine** comme pesticide de référence. Très utilisée en arboriculture, cette molécule avait déjà montré, dans nos travaux antérieurs, qu'elle pouvait modifier la reproduction du perce-oreille : les femelles exposées pondent davantage et obtiennent un meilleur succès d'éclosion, sans altération de leur capacité de prédation. Ces résultats suggèrent une action directe de la deltaméthrine sur les mécanismes de production des œufs, dont les bases moléculaires restent à élucider – un défi que nous avons entrepris de relever grâce à l'écotoxicoprotéomique.

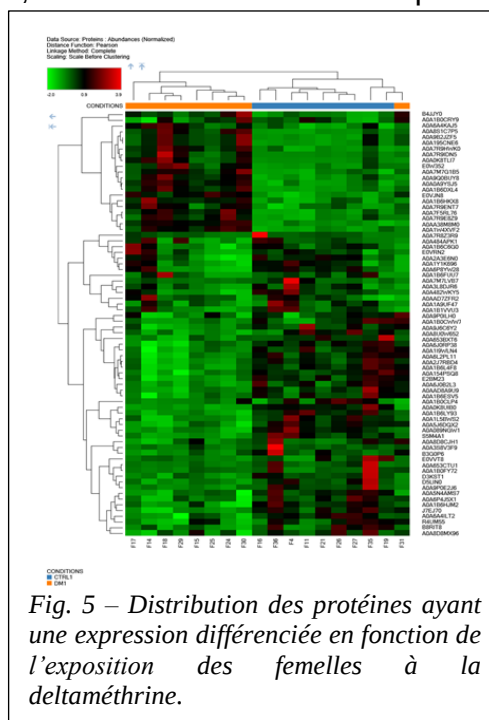
L'objectif de cet axe était donc d'**identifier une signature protéique caractéristique de l'exposition récente du perce-oreille à la deltaméthrine**, ouvrant la voie au **développement d'un outil simple, rapide et efficace** pour diagnostiquer la qualité biologique des milieux. En posant les bases nécessaires à la création d'un bioindicateur d'exposition aux pesticides, cet axe contribue directement à anticiper les effets cachés des expositions sublétales sur la biodiversité et à renforcer la durabilité des agroécosystèmes, en cohérence avec les objectifs du plan Écophyto.

a) Partenariats

La collecte des perce-oreilles a été rendue possible grâce aux partenariats établis avec les arboriculteurs de la région Centre-Val de Loire, déjà impliqués dans la première phase du projet. Pour l'analyse protéomique, nous avons collaboré avec la plateforme **PIXANIM de l'INRAE à Nouzilly**, dotée d'équipements de pointe en spectrométrie de masse. L'arrivée d'un **Orbitrap de dernière génération** à l'automne 2024 a permis de renforcer la précision et la fiabilité des analyses. Ce partenariat a illustré l'importance de mobiliser conjointement les acteurs de terrain, les infrastructures publiques de recherche et les dispositifs technologiques de haut niveau pour répondre aux objectifs du plan Écophyto.

b) Résultats obtenus

Nos travaux ont montré que l'exposition du perce-oreille à la deltaméthrine entraîne l'apparition d'une **signature moléculaire spécifique**, détectable au niveau des protéines (Fig. 5). Cette signature regroupe notamment des protéines impliquées dans la détoxification, le métabolisme énergétique, la régulation du système nerveux et les réponses au stress. Or, ces mêmes protéines ont déjà été identifiées chez d'autres insectes exposés à divers pesticides, ce qui suggère qu'elles pourraient constituer de solides bioindicateurs d'exposition utilisables pour le suivi des populations d'insectes non-cibles. Par ailleurs, nos résultats confirment que le perce-oreille, espèce abondante et facile à collecter dans les zones agricoles et les jardins des particuliers, pourrait offrir un modèle particulièrement intéressant pour appliquer la protéomique comme outil de diagnostic. Son utilisation permettrait d'évaluer rapidement la qualité d'un milieu, en détectant les effets sublétaux des pesticides bien avant que des conséquences visibles n'apparaissent sur les populations ou les écosystèmes.



Notre analyse a également mis en évidence que la réponse du perce-oreille varie selon son stade de reproduction. Avant la ponte, les femelles activent principalement des mécanismes de protection du système nerveux et de renforcement de l'immunité, probablement afin de préserver leur capacité à assurer la descendance. En revanche, après la phase de soins parentaux, la réponse physiologique se déplace vers des fonctions liées à la régulation hormonale, au métabolisme et à la neurotransmission, impliquant notamment le GABA, qui constitue la cible de nombreux insecticides. Ces variations reflètent des stratégies physiologiques adaptées aux différentes étapes du cycle de vie, mais elles révèlent aussi que la sensibilité des insectes aux pesticides n'est pas uniforme : elle dépend du moment où l'exposition survient. Ainsi, un même traitement phytosanitaire peut avoir des conséquences très différentes (et toujours non-visibles) selon que les populations sont composées de femelles en pré- ou post-ponte. Ce constat souligne l'importance d'intégrer la biologie des espèces non-cibles dans les évaluations de risques, afin de mieux anticiper les effets différenciés des pesticides. Il ouvre également la voie à une gestion agricole plus fine, qui tienne compte de ces variations de sensibilité pour réduire les impacts sur les auxiliaires de cultures et préserver leurs services écosystémiques.

Globalement, les résultats de cet axe 2 mettent en évidence que :

- La deltaméthrine peut perturber profondément la biologie des insectes, même sans effets immédiats visibles ;
- La protéomique offre un **outil prometteur** pour détecter précocement ces perturbations ;
- Certains **marqueurs protéiques communs** pourraient servir à développer des outils pratiques pour diagnostiquer l'exposition aux pesticides dans les agro-écosystèmes.

Ces résultats offrent des perspectives intéressantes pour les politiques publiques. Ils ouvrent la voie à la création d'outils capables de détecter les impacts invisibles des pesticides sur la biodiversité fonctionnelle, d'anticiper les risques pour les services écosystémiques, et d'accompagner efficacement les agriculteurs dans la réduction de leur dépendance aux produits phytosanitaires.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce projet, dont le financement de la doctorante a été assuré à 42% par le plan Éco-phyto II+ et à 58% par la Région Centre-Val de Loire (les consommables ayant été intégralement pris en charge par la Région et le laboratoire d'accueil), a permis de faire **progresser significativement notre compréhension des effets sublétaux des pesticides** sur le perce-oreille européen, un insecte auxiliaire clé dans les vergers. Nous avons montré que, même à **faibles doses**, les pesticides peuvent induire des perturbations biologiques importantes, parfois invisibles au niveau comportemental, mais détectables grâce à des marqueurs protéiques spécifiques. Ces **bioindicateurs** pourraient constituer un outil innovant et prometteur pour anticiper les impacts non intentionnels sur les populations d'insectes utiles et, plus largement, sur les services écosystémiques qu'ils assurent.

En plus de ses résultats scientifiques, le projet a permis de **former une doctorante**, Laura Pasquier, qui a acquis des compétences avancées en écotoxicologie, en physiologie et écologie des insectes, ainsi qu'en protéomique. Ses travaux de thèse ont conduit à **8 publications scientifiques** dans des journaux internationaux à comité de lecture (5 publiées, 2 encore en cours d'évaluation, et 1 en cours de rédaction), témoignant à la fois de la solidité des résultats obtenus et de l'investissement conjoint de la doctorante et de ses encadrants. Au-delà de ces productions scientifiques, sa formation a renforcé les expertises scientifiques disponibles dans ces domaines stratégiques, contribuant ainsi à éclairer les politiques publiques et à accompagner la transition vers des pratiques agricoles plus durables.

Les **partenariats avec des arboriculteurs et arboricultrices** de la région ont été essentiels dans la réussite de ce projet. Leur collaboration a permis de collecter des insectes issus de populations naturelles, d'étudier les effets des pesticides dans des contextes de gestion variés et de préparer la mise en œuvre concrète de mesures de préservation et de valorisation du perce-oreille comme auxiliaire de lutte biologique. Ces collaborations se poursuivent aujourd'hui afin de tester directement l'intérêt de favoriser cet insecte dans les vergers, tout en réduisant l'utilisation des produits phytosanitaires.

Enfin, les résultats de ce projet ouvrent la voie au **développement d'outils opérationnels fondés sur des biomarqueurs protéiques**. Ces outils permettront de détecter précocement les effets sublétaux des pesticides sur les insectes auxiliaires et, plus largement, sur les écosystèmes agricoles. En identifiant les perturbations biologiques avant qu'elles ne se traduisent par des impacts visibles ou irréversibles, ces bioindicateurs offriront aux décideurs, gestionnaires et agriculteurs un moyen concret d'**anticiper** les risques, d'**adapter** les pratiques phytosanitaires et de **préserver** la biodiversité fonctionnelle essentielle à la durabilité des cultures.

En conclusion, ce projet a :

- Produit des connaissances nouvelles sur la biologie et la résilience d'un insecte auxiliaire de cultures face à certains pesticides.
- Ouvert une nouvelle perspective d'utilisation de biomarqueurs protéiques dans la détection d'effets autrement « invisibles » et l'évaluation de la qualité des milieux
- Formé des acteurs scientifiques compétents
- Renforcé les liens avec le monde agricole pour promouvoir des pratiques durables.

Les résultats de notre projet fournissent ainsi des bases solides pour soutenir la **réduction des usages de pesticides**, protéger la biodiversité fonctionnelle et garantir la durabilité des agroécosystèmes. Ils illustrent également l'efficacité du cofinancement national et régional pour répondre à des problématiques prioritaires dans le cadre du plan Écophyto.



BioIndicFin

« Mise en place de bioindicateurs fins de la qualité de l'environnement grâce à un auxiliaire commun des vergers »

« Améliorer les connaissances et les outils pour demain et encourager la recherche et l'innovation - thèses »

Rapport final Vn [Lécureuil C & Meunier J]

Date de la version du rapport : 30/08/2025

Coordonnées du laboratoire

IRBI (Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte)

UMR CNRS 7261 & Université de Tours

<https://irbi.univ-tours.fr/>

Identité et coordinateur du projet de recherche (adresse et courriel)

Lécureuil Charlotte et Meunier Joël

IRBI

Parc de Grammont

37200 Tours

charlotte.lecureuil@univ-tours.fr et joel.meunier@univ-tours.fr

Action pilotée par les Ministères chargés de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche (MTEBFMP), de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA), du Travail, de la Santé, des Solidarités et des Familles (MTSSF), et de l'Education nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (MENESR) avec l'appui financier de l'Office Français pour la Biodiversité (OFB), par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au plan Écophyto II+

Contexte général et enjeux scientifiques et techniques

L'utilisation de produits phytopharmaceutiques entraîne inévitablement, même à faibles doses et de manière non intentionnelle, l'exposition d'insectes non-cibles. Ces expositions chroniques peuvent provoquer des perturbations subtiles mais déterminantes dans leur biologie, avec des répercussions potentielles sur l'agriculture, l'économie et l'écologie des vergers. Les risques sont particulièrement préoccupants lorsque ces insectes remplissent des fonctions essentielles au bon fonctionnement des agroécosystèmes, telles que la régulation naturelle des ravageurs, la pollinisation ou le maintien des équilibres trophiques. C'est précisément dans ce contexte que s'inscrit le plan **Écophyto**, dont l'ambition est de réduire à la fois la consommation, les risques et les impacts des produits phytopharmaceutiques. Or, atteindre ces objectifs ne peut pas se limiter à une baisse des volumes utilisés : il est tout aussi crucial de comprendre et de détecter les effets directs et indirects, souvent invisibles, que ces produits exercent sur les organismes auxiliaires.

Les enjeux scientifiques et techniques sont donc doubles : d'une part, mieux caractériser la nature et les mécanismes physiologiques des effets sublétaux des pesticides, et d'autre part, développer des outils capables de révéler ces altérations précocement afin d'évaluer de manière fiable l'état de santé des populations exposées. Parmi ces outils, les biomarqueurs protéiques apparaissent particulièrement prometteurs, puisqu'ils permettent de détecter rapidement des perturbations biochimiques avant qu'elles n'affectent visiblement la reproduction, la survie ou les services écosystémiques, et ouvrent ainsi la voie à une adaptation des pratiques agricoles.

Dans cette perspective, il est nécessaire de s'appuyer sur des modèles biologiques à la fois représentatifs des insectes auxiliaires et pertinents pour les systèmes de culture. Le perce-oreille européen (*Forficula auricularia*) réunit ces qualités : abondant, facile à collecter et suivi sur l'ensemble du cycle annuel, il joue un rôle clé dans la régulation de ravageurs majeurs des vergers de fruits à pépins, tels que les pucerons, les enrouleuses et les psylles. Ce statut d'auxiliaire en fait un indicateur particulièrement adapté pour évaluer les effets sublétaux des pesticides, d'autant que plusieurs travaux ont déjà montré que même de très faibles doses peuvent altérer des traits essentiels de son histoire de vie, notamment les soins maternels ou l'investissement reproductif dans un second cycle.

Objectifs généraux du projet

Sur la base de ce contexte, le projet BioIndicFin poursuit deux objectifs généraux et complémentaires. Le premier est de **mieux comprendre comment les pesticides, même à faibles doses et de manière chronique, affectent la biologie des insectes auxiliaires**, en particulier le perce-oreille européen. L'accent sera mis sur des traits clés de son histoire de vie, tels que les soins maternels, l'investissement reproductif et la survie des jeunes, qui conditionnent à la fois la dynamique des populations et le maintien des services écosystémiques rendus aux vergers. Le second objectif est de **développer et valider des biomarqueurs protéiques sensibles et précoces, capables de révéler ces effets sublétaux** avant qu'ils ne deviennent visibles, et ainsi

d'offrir un outil opérationnel pour évaluer rapidement la santé des populations exposées. Ensemble, ces objectifs répondent directement aux enjeux du plan Écophyto, en fournissant à la fois de nouvelles connaissances sur les mécanismes d'action des pesticides et des indicateurs concrets pour limiter leurs risques et impacts tout en favorisant des pratiques agricoles durables et respectueuses de la biodiversité.

Quelques éléments de méthodologie (et difficultés éventuelles rencontrées)

Le projet a mobilisé des approches phénotypiques, mécanistiques et moléculaires pour analyser les effets sublétaux à différents niveaux biologiques et établir des liens entre les modifications moléculaires et leurs répercussions comportementales et physiologiques. Au cours des trois années du projet, huit expériences indépendantes ont été menées, dont les principales méthodologies sont détaillées ci-dessous.

Collecte et élevage des insectes testés

- Tous les perce-oreilles utilisés proviennent de campagnes annuelles d'échantillonnage menées directement dans des vergers de la région Centre-Val de Loire. Nous n'avons pas utilisé d'insectes de laboratoire.
- En raison du long cycle de vie du perce-oreille (relativement aux autres insectes), chaque individu testé a dû être maintenu et suivi pendant plusieurs mois afin de mesurer l'impact des pesticides sur leurs comportements et leurs traits d'histoire de vie.

Analyses phénotypiques après exposition à des pesticides :

- Exposition à des traitements pesticides à des doses réalistes, incluant l'herbicide glyphosate et l'insecticide deltaméthrine, ainsi que des régulateurs de croissance (pyriproxyfène, méthoprène).
- Suivi des comportements dont soins maternels (regroupement, soins et défense des œufs), de l'activité locomotrice et du toilettage.
- Les comportements ont été enregistrés à l'aide de caméras infrarouges, adaptées à l'activité nocturne de l'espèce, puis analysés grâce à des logiciels de suivi automatisé (tracking).
- Mesure de paramètres physiologiques et reproductifs tels que la date de ponte, le nombre d'œufs produits, la production d'une seconde ponte, et les traits des jeunes (poids, taille, développement).

Analyses mécanistiques :

- Manipulation expérimentale de l'hormone juvénile (JH) pour étudier son rôle dans le déclenchement et le maintien des soins maternels.
- Suivi du comportement des femelles avant et après oviposition et analyses moléculaires ciblées de gènes clés de la voie JH (JHAMT, Kr-h1).

Analyse protéomique exploratoire :

- Étude sans *a priori* de la dynamique des protéines en réponse à l'exposition à la deltaméthrine.
- Utilisation de méthodes analytiques à haut débit basées sur la spectrométrie de masse pour détecter des signatures protéiques spécifiques et identifier des biomarqueurs précoces d'exposition.

Difficultés rencontrées :

- Le cycle de vie particulièrement long du perce-oreille ne permet de conduire qu'une seule série d'expériences par an. Cette contrainte réduit la réactivité du projet face à des résultats inattendus, car il n'est pas possible de répéter rapidement les essais dans la même année.
- Le perce-oreille s'est révélé étonnamment robuste à l'exposition à de nombreux pesticides. Cette résistance nous a conduits à restreindre le nombre de produits testés par rapport au plan initial, afin de concentrer les efforts sur ceux présentant les effets les plus marqués et ainsi maximiser les chances de réaliser la seconde partie du projet (analyses protéomiques).

Résultats obtenus

Les différentes approches mises en œuvre ont révélé une diversité d'effets sublétaux des pesticides sur le perce-oreille européen.

1. Effets phénotypiques des pesticides

Les résultats obtenus mettent en évidence des effets contrastés et subtils des pesticides sur les traits phénotypiques du perce-oreille, qui varient en fonction du sexe et du stade de vie des individus. Le pyriproxyfène n'a eu aucun effet sur les traits comportementaux tels que les soins maternels, le toilettage ou la défense, ainsi que des traits liés à la reproduction. Chez les mâles, nous avons montré que l'exposition sublétales au glyphosate (appliqué sous forme de Roundup®) a un effet spécifique à faible dose : une relation positive entre activité et poids, absente dans les groupes témoins et à forte dose. En revanche, aucune modification n'a été détectée concernant l'agressivité, le comportement social (agrégation), la réponse immunitaire ou la survie après exposition à un champignon pathogène. Ces résultats, globalement cohérents entre six populations naturelles testées malgré une certaine variabilité inter-populations, suggèrent que le glyphosate peut induire des altérations comportementales discrètes chez les mâles sans affecter d'autres dimensions majeures de leur condition physique.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que les effets phénotypiques des pesticides sur le perce-oreille sont souvent discrets, au moins à court terme, et fortement modulés par le sexe et le stade de vie. Ils peuvent néanmoins affecter des traits clés de l'histoire de vie, ce qui a des implications pour la persistance des populations et les

services écosystémiques qu'elles fournissent. Cette complexité souligne l'importance de combiner approches comportementales et analyses moléculaires pour détecter précocement les perturbations induites par les pesticides et mieux anticiper leurs impacts sur la biodiversité fonctionnelle des agroécosystèmes.

2. Analyses mécanistiques de la régulation hormonale

Nos travaux sur le contrôle hormonal du comportement de soin maternel chez le perce-oreille européen mettent en évidence un rôle différencié de l'hormone juvénile (JH) selon le stade reproductif des femelles. Chez les femelles post-oviposition, l'inhibition de la JH obtenu par une exposition au Precocene I réduit significativement les comportements maternels clés – rassemblement, surveillance et toilettage des œufs – tandis que l'augmentation artificielle de JH ou l'exposition à des agonistes n'a aucun effet. Ces perturbations sont spécifiques aux soins parentaux et ne touchent ni l'activité générale, ni la masse corporelle, ni le développement des œufs ou la survie des jeunes, ce qui confirme que la JH est nécessaire au maintien des comportements de soin après ponte. En revanche, chez les femelles pré-oviposantes, la modulation de JH seule, par application ou injection d'hormone, d'agonistes ou d'inhibiteurs, ne déclenche pas l'initiation des soins ni ne prévient le cannibalisme d'œufs étrangers. Ces résultats montrent que d'autres signaux ou voies hormonales sont nécessaires pour initier le comportement parental avant la ponte.

Dans l'ensemble, ces études montrent que la JH joue un rôle central dans le maintien des soins maternels après ponte, mais n'est pas le déclencheur initial du comportement. Elles mettent en évidence la complexité hormonale régissant la parentalité chez le perce-oreille et apportent des éléments clés pour comprendre comment les perturbations endocriniennes, notamment induites par des pesticides de type régulateur de croissance (IGR), peuvent affecter indirectement la survie des jeunes et la durabilité des populations. Ces résultats offrent ainsi un cadre prédictif pour anticiper l'impact des IGR sur la reproduction et la persistance des populations d'insectes auxiliaires dans les agroécosystèmes.

3. Analyse protéomique exploratoire

Nos analyses protéomiques ont révélé que l'exposition sublétalement à la deltaméthrine (pesticide de la famille des pyréthrinoides) induit des changements significatifs dans le profil protéique de la tête, indépendamment du stade physiologique (avant ponte ou après la période de soins maternels). Un ensemble central de 80 protéines a montré des variations d'abondance cohérentes, avec une régulation positive de 46 protéines impliquées dans la détoxification (NADPH-cytochrome P450 réductase, arginine kinase), le métabolisme énergétique et la neuroprotection (glutamate déshydrogénase), et une régulation négative de 34 protéines liées au métabolisme lipidique et au stress cellulaire (HSP70, HSP83). Ces protéines reflètent des réponses conservées au pesticide et constituent des candidats prometteurs pour le suivi bio-indicatif de l'exposition chimique dans les populations de terrain.

Les réponses protéomiques dépendaient également du stade physiologique : avant ponte, les modifications concernaient surtout la signalisation calcique, la neurogenèse et la protection neuronale, tandis qu'après les soins maternels, elles touchaient principalement la neurotransmission (GABA) et la régulation hormonale.

Ces différences suggèrent que la réponse à la deltaméthrine est modulée par les priorités physiologiques propres à chaque stade, avec des mécanismes rapides de neuroprotection chez les femelles non reproductrices et des ajustements métaboliques et hormonaux chez les femelles post-soins.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que, même à faibles doses, les pesticides peuvent perturber profondément l'équilibre biologique des perce-oreilles, souvent avant toute manifestation visible au niveau comportemental ou reproductif. L'écotoxicoprotéomique s'affirme ainsi comme un outil puissant pour détecter précocement ces perturbations et pour identifier des biomarqueurs pertinents, permettant de suivre les populations d'insectes auxiliaires et de préserver leurs services écosystémiques.

Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques, valorisation

Implications pratiques :

Nos résultats ont plusieurs implications pratiques pour la gestion des agroécosystèmes et la préservation des auxiliaires naturels. D'une part, la détection précoce de modifications protéiques chez le perce-oreille européen permet d'identifier rapidement les effets sublétaux des pesticides avant qu'ils ne se traduisent par des altérations visibles du comportement ou de la reproduction. Cela ouvre la voie à l'utilisation de biomarqueurs protéiques comme outil de suivi et d'évaluation de l'exposition des populations aux produits chimiques, contribuant ainsi à une surveillance plus fine et proactive des insectes auxiliaires. D'autre part, la résilience phénotypique du perce-oreille face à de faibles doses de pesticides renforce sa valeur comme agent de lutte biologique, garantissant que ses populations restent stables et opérationnelles pour la régulation naturelle des ravageurs dans différents types de cultures. Ces observations permettent donc d'optimiser les pratiques agricoles en conciliant protection des cultures et maintien des services écosystémiques fournis par les insectes auxiliaires.

Recommandations :

Les résultats de BioIndicFin suggèrent plusieurs recommandations pour optimiser les pratiques phytosanitaires tout en préservant les insectes auxiliaires. Il est conseillé de prendre en compte la variabilité biologique naturelle des populations et la présence d'espèces cryptiques lors de l'évaluation des effets sublétaux des pesticides. L'intégration de biomarqueurs protéiques et l'analyse de la régulation hormonale constituent des outils précieux pour anticiper les impacts des régulateurs de croissance et ajuster les traitements afin de minimiser leurs effets sur les perce-oreilles et autres auxiliaires. Enfin, il pourrait être pertinent d'évaluer le rôle du perce-oreille européen comme agent complémentaire de lutte biologique, afin de réduire l'usage de produits phytosanitaires tout en maintenant l'efficacité de la régulation naturelle des ravageurs.

Limites ou généralisations éventuelles des résultats :

Les résultats obtenus doivent être interprétés avec prudence, car l'analyse des biomarqueurs protéiques n'a été réalisée qu'avec un seul insecticide et sur une seule population de perce-oreilles. Avant de généraliser ces conclusions ou de développer

des outils de quantification robustes pour le suivi des populations et l'évaluation des risques écotoxicologiques, il est nécessaire de répéter ces analyses sur plusieurs populations et avec différents types de pesticides afin de confirmer la pertinence et la fiabilité des biomarqueurs identifiés.

Réalisations pratiques et valorisation :

Le projet a démontré la faisabilité d'identifier des biomarqueurs protéiques indiquant l'exposition aux pesticides, tout en approfondissant la compréhension des mécanismes hormonaux qui régulent les comportements maternels chez le perce-oreille. Il a également favorisé la collaboration avec des arboriculteurs locaux et permis de renforcer les liens entre recherche et terrain. Ces acquis contribuent à la conception d'outils de suivi adaptés à l'agroécologie et à la promotion de pratiques agricoles plus durables. Par ailleurs, le projet a soutenu la formation d'une doctorante et assuré la diffusion des résultats auprès de la communauté scientifique et du grand public.

Partenariats mis en place, projetés, envisagés

La réussite de ce projet a reposé sur des partenariats solides entre le terrain agricole et les infrastructures de recherche. La collaboration avec dix arboriculteurs et arboricultrices de la région Centre-Val de Loire a été essentielle, leur ouverture des vergers et le partage de leurs pratiques culturelles permettant de constituer un jeu de données représentatif de différentes conditions de gestion. Le travail analytique a été appuyé par la plateforme PIXANIM de l'INRAE à Nouzilly, équipée de technologies avancées en spectrométrie de masse, renforcées par l'installation d'un Orbitrap de dernière génération. Ces collaborations illustrent l'importance d'associer chercheurs, acteurs de terrain et infrastructures technologiques pour produire des résultats robustes et directement applicables. Pour l'avenir, il est prévu de poursuivre et d'étendre ces partenariats, en impliquant un réseau plus large d'interprofessions fruits et légumes afin d'évaluer les effets des pesticides dans un plus grand nombre de contextes agroécologiques.

Pour en savoir plus (quelques références)

Merleau, Leslie-Anne, Izia Larrigaldie, Océane Bousquet, et al. « Exposure to pyriproxyfen (juvenile hormone agonist) does not alter maternal care and reproduction in the European earwig ». *Environmental Science and Pollution Research* 29, no 48 (2022): 72729-46. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20970-z>.

Mauduit, Emilie, Charlotte Lécureuil, et Joël Meunier. « Sublethal exposure to deltamethrin stimulates reproduction and has limited effects on post-hatching maternal care in the European earwig ». *Environmental Science and Pollution Research* 28, no 29 (2021): 39501-12. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13511-7>.

Meunier, Joël, Juliette Dufour, Sophie Van Meyel, Magali Rault, et Charlotte Lécureuil. « Sublethal exposure to deltamethrin impairs maternal egg care in the European earwig *Forficula auricularia* ». *Chemosphere* 258 (novembre 2020): 127383. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127383>.

Liste des opérations de valorisations issues du contrat (articles de valorisation, participation à des colloques, enseignement et formation, communication, expertises...)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	
Publications scientifiques parues	#1 - Pasquier L, Groutsch J, Verger M, Wallart V, Meunier J* and Lécureuil C* (2025). Exposure to a glyphosate-based herbicide does not alter maternal care and offspring quality in the European earwig. <i>Ecotoxicology</i>, <i>in press</i>. (*co-last authors) https://doi.org/10.1007/s10646-025-02912-w #2 - Pasquier L, Dupont S, Devers S, Lécureuil C* and Meunier J* (2025). Alternative reproductive strategies in two cryptic species of the European earwig complex. <i>The science of Nature</i>, 112 (4): 48 (*co-last authors) https://doi.org/10.1007/s00114-025-01999-9 https://univ-tours.hal.science/hal-05104663 (Green Open Access) #3 - Honorio, RM, Cheutin MC, Pasquier L, de Wever S, Perdereau E, Villalta I, Lécureuil C and Meunier J. (2025) The European earwig: A model species for studying the (early) evolution of social life. <i>Insectes Sociaux</i> 72 (2): 177-92. https://doi.org/10.1007/s00040-024-00985-0 https://univ-tours.hal.science/hal-04666215 (Green Open Access) #4 - Pasquier L, Lécureuil C*, and Meunier J* (2024). Limited effects of a glyphosate-based herbicide on the behaviour and immunity of males from six populations of the European earwig. <i>Environmental Science and Pollution Research</i> 31: 44205-44217. (*co-last authors) https://doi.org/10.1007/s11356-024-34063-6 https://univ-tours.hal.science/hal-04628023 (Green Open Access) #5 - Merleau LA, Larrigaldie I, Bousquet O, Devers S, Keller M, Lécureuil C*, and Meunier J* (2022). Exposure to pyriproxyfen (juvenile agonist) does not alter maternal care and reproduction in the European earwig. <i>Environmental Science and Pollution Research</i> 29 (48): 72729-72746. (*co-last authors) https://doi.org/10.1007/s11356-022-20970-z https://hal-univ-tours.archives-ouvertes.fr/hal-03678045 (Green Open Access)
Publications scientifiques en phase de révision	#6 - Pasquier L, Wallart V, Devers S, Meunier J* and Lécureuil C* (<i>Under revision</i>). Juvenile hormone and maternal egg care in the European earwig (Part I): neither the manipulation of JH, agonist, nor Precocene triggers the onset of care. <i>Under revision in Hormones and Behavior</i> (*co-last authors)

Publications scientifiques en cours d'écriture	#7 - Pasquier L, Wallart V, Louis Audebert, Devers S, Meunier J* and Lécureuil C* (<i>Under revision</i>). Juvenile hormone and maternal egg care in the European earwig (Part II): Exposure to precocene I reduces care behaviour in post-oviposition females. <i>Under revision in Hormones and Behavior</i> (*co-last authors) #8 - Pasquier L, Thomas D, Labas V, Teixeira AP, Meunier J* and Lécureuil C*. Sublethal exposure to deltamethrin alters earwig brain proteome across reproductive stages.
COLLOQUES	
Participations passées à des colloques	- IUSSI, Paris, 19/06/25, Oral : « Does juvenile hormone regulate maternal egg care in the European earwig? ». Laura Pasquier, Joël Meunier*, Charlotte Lécureuil* (*co-last authors) - IUSSI, Paris, 19/06/25, Oral : « Alternative reproductive strategies in two cryptic species of the European earwig complex ». Joël Meunier, Laura Pasquier, Charlotte Lécureuil (*co-last authors) - ABS, London (Canada), 25/07/24, Oral : "Does exposure to a widely used herbicide affect maternal care in an insect with family life? ". Laura Pasquier, Julier Groutsch, Violette Wallart, Charlotte Lécureuil*, Joël Meunier* (*co-last authors) - SFECA, Tours, 24/05/23, Oral : « Effets d'une exposition au glyphosate sur le comportement des perce-oreilles », Laura Pasquier, Joël Meunier*, Charlotte Lécureuil* (*co-last authors) - UISSI, Toulouse, 29/08/23, Oral : « Les comportements sociaux reflètent-ils une adaptation locale chez le forficule européen ? », Laura Pasquier, Charlotte Lécureuil*, Joël Meunier* (*co-last authors) - Euro PhD, Florence (Italie), 06/11/23, Oral : « Do social behaviors reflect local adaptation in the European earwig? », Laura Pasquier, Charlotte Lécureuil*, Joël Meunier* (*co-last authors) - Biotechnocentre, Orléans, 20/10/23, Oral : « Do social behaviors reflect local adaptation in the European earwig? »; Laura Pasquier, Charlotte Lécureuil*, Joël Meunier* (*co-last authors)
Participations futures à des colloques	
THÈSES	
Thèses en cours	Laura Pasquier - Soutenance prévue le 26/11/25

ARTICLES DE VALORISATION/ VULGARISATION	
Articles de valorisation parus	
Articles de valorisation à paraître	
Articles de valorisation prévus	
AUTRES ACTIONS VERS LES MÉDIAS	
Actions vers les médias (interviews...) effectuées	- Présentation de nos travaux sur le modèle forficule et interview J. Meunier et C. Lécureuil - France 3 Région - Diffusion septembre 2023
Actions vers les médias prévues	
ENSEIGNEMENT/ FORMATION	
Enseignements/formations dispensés	- CM 2h Master Erasmus Mundus Environmental Contamination and Toxicology d'Anglet. "Ecotoxicology as a tool to study social evolution in insects". J. Meunier.
Enseignements/formations prévus	
EXPERTISES	
Expertises menées	- « Les rendez-vous de l'arbo - Edition 2022 » 13 décembre 2022 - Valence, Drôme - « Les forficules et les pesticides dans les vergers » présentation orale par J. Meunier
Expertises en cours	
Expertises prévues	
MÉTHODOLOGIES (GUIDES...)	
Méthodologies produites	
Méthodologies en cours d'élaboration	
Méthodologies prévues	
AUTRES	
Précisez...	

Résumés

☐ Résumé court

Ce projet montre que les pesticides, même à faibles doses, induisent des perturbations biologiques détectables par des biomarqueurs protéiques chez le perce-oreille, un auxiliaire clé des vergers. Ces bioindicateurs offrent un outil innovant pour anticiper les impacts sublétaux sur la biodiversité fonctionnelle. Les résultats ouvrent la voie à des outils opérationnels pour guider les pratiques phytosanitaires durables.

□ Résumé long

L'usage de produits phytosanitaires entraîne l'exposition accidentelle d'organismes non ciblés. Même à faibles doses, ces expositions peuvent perturber la reproduction, le comportement ou la survie de ces organismes, avec des effets en cascade sur la santé des cultures, l'économie agricole et l'équilibre écologique. La préservation de cette biodiversité est donc indispensable pour garantir la durabilité agricole, ce qui pose deux défis majeurs : comprendre les mécanismes physiologiques des effets sublétaux des pesticides sur les organismes non ciblés et développer des outils capables de détecter ces perturbations avant tout déclin visible des populations.

Le perce-oreille européen (*Forficula auricularia*) constitue un modèle biologique pertinent pour relever ces défis. Cet insecte, très abondant dans les vergers, est un prédateur efficace de ravageurs, facile à collecter, et sa longévité (jusqu'à 18 mois) permet un suivi continu tout au long de l'année. De plus, nos travaux antérieurs ont montré que de faibles doses de pesticides pouvaient perturber des fonctions biologiques essentielles de cet insecte, telles que les soins parentaux ou l'investissement reproducteur.

Les objectifs du projet BioIndicFin étaient donc : (1) d'évaluer les effets sublétaux des pesticides sur le comportement et la physiologie du perce-oreille dans des conditions réalistes de terrain, et (2) d'identifier des marqueurs moléculaires précoces permettant de détecter ces perturbations et de valider l'approche bioindicatrice.

Pour atteindre le premier objectif, nous avons d'abord étudié les effets sublétaux du glyphosate et du pyriproxyfène sur le comportement et la physiologie du perce-oreille, en incluant mâles et femelles issus de six populations naturelles afin de tenir compte de la variabilité biologique. Les résultats ont montré, pour le glyphosate, des effets limités mais mesurables, principalement sur la relation activité/poids chez les mâles, sans altération des soins maternels ni de la survie des jeunes. Ces observations soulignent la robustesse de l'espèce face à cet herbicide tout en révélant des variations selon le sexe et la population, confirmant l'importance d'intégrer la diversité biologique dans l'évaluation des pesticides. Nous avons ensuite exploré les mécanismes physiologiques susceptibles de réguler ces effets sublétaux via des manipulations hormonales. Nos analyses ont montré que l'hormone juvénile (JH) est indispensable au maintien des soins maternels, mais insuffisante pour les déclencher chez des femelles sans expérience de ponte. Cette voie hormonale constitue donc une cible potentielle des pesticides régulateurs de croissance (IGR), susceptibles de perturber les comportements sociaux essentiels à la survie des jeunes.

Pour le second objectif, nous avons recherché des bioindicateurs moléculaires précoces en utilisant l'écotoxicoprotéomique, une approche innovante permettant d'identifier des signatures protéiques révélant une exposition aux pesticides avant tout effet visible. La deltaméthrine, connue pour stimuler la ponte sans affecter la prédation, a été utilisée comme référence. Les analyses ont révélé une signature protéique spécifique regroupant des protéines impliquées dans la détoxification, le métabolisme énergétique, la régulation nerveuse et la réponse au stress. Certaines de ces protéines étant conservées chez d'autres insectes exposés, elles pourraient constituer des bioindicateurs génériques. Nos résultats montrent également que la réponse protéique varie selon le stade reproductif : avant la ponte, les femelles mobilisent principalement des mécanismes de protection du système nerveux et de renforcement de l'immunité ; après les soins parentaux, la réponse s'oriente vers la régulation hormonale et la

neurotransmission. Ces observations indiquent que la sensibilité aux pesticides dépend du moment de l'exposition et qu'une évaluation complète doit tenir compte du cycle de vie et de la biologie de l'espèce

En conclusion, BioIndicFin a démontré que même à faibles doses, les pesticides peuvent induire des perturbations sublétales, détectables précocement grâce à des marqueurs protéiques. Ces bioindicateurs constituent un outil innovant pour anticiper les impacts des pesticides sur les insectes auxiliaires et les services écosystémiques. Par ailleurs, le projet a permis de former une doctorante spécialisée en écotoxicologie et protéomique, de consolider des partenariats avec dix arboriculteurs locaux favorisant l'application directe des résultats, et de fournir une preuve de concept qu'un outil opérationnel pour diagnostiquer précocement les perturbations biologiques dans les agroécosystèmes est envisageable avec le perce-oreille. Dans l'ensemble, ces travaux offrent une base solide pour soutenir la réduction des usages de pesticides, protéger la biodiversité fonctionnelle et garantir la durabilité des cultures, en cohérence avec les priorités du plan Écophyto.

□ Mots-clés

Bioindicateurs – biodiversité – espèce sentinelle – auxiliaire - verger



RAPPORT SCIENTIFIQUE

Dans le rapport scientifique, nous vous prions de fournir des éléments méthodologiques présentés succinctement et clairement afin de pouvoir avoir une vision des limites des résultats

BioIndicFin

« Mise en place de bioindicateurs fins de la qualité de l'environnement grâce à un auxiliaire commun des vergers »

« Améliorer les connaissances et les outils pour demain et encourager la recherche et l'innovation - thèses »

Rapport final Vn [Lécureuil C & Meunier JJ]

Date de la version du rapport : 30/08/2025

Coordonnées du laboratoire

IRBI (Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte)

UMR CNRS 7261 & Université de Tours

<https://irbi.univ-tours.fr/>

Identité et coordinateur du projet de recherche (adresse et courriel)

Lécureuil Charlotte et Meunier Joël

IRBI (Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte) – UMR7261

Parc de Grammont

37200 Tours

charlotte.lecureuil@univ-tours.fr et joel.meunier@univ-tours.fr

Action pilotée par les Ministères chargés de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche (MTEBFMP), de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA), du Travail, de la Santé, des Solidarités et des Familles (MTSSF), et de l'Education nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (MENESR) avec l'appui financier de l'Office Français pour la Biodiversité (OFB), par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au plan Écophyto II+

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

L'utilisation de produits phytosanitaires entraîne fréquemment l'exposition non intentionnelle et à faibles doses d'insectes non-cibles (Aktar et al., 2009; Guedes et al., 2016). De plus en plus de travaux démontrent que ces expositions peuvent induire des perturbations subtiles mais significatives de la biologie des insectes, avec des conséquences potentielles sur l'agronomie, l'économie et l'écologie des agroécosystèmes. Ces effets sont particulièrement préoccupants lorsque les insectes concernés fournissent des services écosystémiques essentiels, tels que la régulation naturelle des ravageurs, la pollinisation ou la stabilisation des réseaux trophiques (Schowalter et al., 2018). Dans ce contexte, identifier et comprendre ces effets non intentionnels, ainsi que développer des méthodes capables de les détecter de manière précoce et fiable, constitue donc une priorité pour améliorer la gestion des pesticides et limiter leurs impacts négatifs sur les cultures et les écosystèmes environnants.

L'utilisation d'indicateurs fins et fiables pour évaluer la qualité des populations d'insectes constitue une approche particulièrement pertinente pour atteindre cet objectif. Ces indicateurs doivent permettre de détecter précocement les perturbations biochimiques, avant l'apparition de signes phénotypiques irréversibles, et ainsi anticiper les ajustements nécessaires dans les pratiques phytosanitaires. Parmi ces indicateurs, les biomarqueurs protéiques apparaissent comme une piste particulièrement prometteuse (Gouveia et al., 2019). Leur analyse offre la possibilité de quantifier rapidement et de manière sensible les effets sublétaux des pesticides, qu'ils se manifestent à court ou à long terme (Meslin et al., 2021; Zhang et al., 2021; Zouré et al., 2020).

Le forficule européen, *Forficula auricularia* L. (Dermaptère), représente un modèle particulièrement adapté pour développer ces bioindicateurs protéiques (Fig. 6). Cette espèce est largement répandue dans les agroécosystèmes, facile à collecter sur le terrain, et possède une durée de vie suffisamment longue (jusqu'à 18 mois) pour permettre le suivi des populations à différents moments de l'année. En tant que prédateur généraliste, le forficule consomme plusieurs ravageurs des vergers de fruits à pépins, tels que les pucerons, les enrouleuses et les psylles (Dib et al., 2011; Lordan et al., 2015; Moerkens et al., 2011; Orpet et al., 2019; Sauphanor and Sureau, 1993). Par ailleurs, des données existantes documentent les effets létaux et sublétaux de divers pesticides sur cette espèce (Fountain and Harris, 2015; Le Navenant et al., 2019; Malagnoux et al., 2014; Orpet et al., 2019), et des travaux récents montrent que de très faibles doses peuvent modifier des paramètres essentiels de leur biologie, tels que les soins maternels ou l'investissement reproductif des femelles dans un second cycle de reproduction (Mauduit et al., 2021; Meunier et al., 2020).



Fig. 6 - Femelle du perce-oreille Européen s'occupant de ses petits après l'éclosion.

Sur cette base, le projet de thèse de Laura Pasquier, cofinancé dans le cadre du plan Écophyto II+ (axe « Améliorer les connaissances et les outils pour demain et encourager la recherche et l'innovation – thèses »), avait pour ambition : (1) **d'évaluer les effets sublétaux des pesticides sur le comportement et la physiologie du**

perce-oreille en conditions réalistes de terrain, afin de mesurer leur impact sur la capacité de cet insecte à maintenir ses fonctions écologiques dans des milieux contaminés ; et (2) **d'identifier des marqueurs moléculaires précoces**, capables de détecter en amont d'éventuelles perturbations phénotypiques permettant ainsi de valider l'approche bioindicatrice.

Ces objectifs combinent des questions appliquées, directement utiles pour la gestion des vergers, et des questions fondamentales sur la biologie et la physiologie des forficules. Le projet s'inscrit ainsi pleinement dans le cadre scientifique et opérationnel du plan Écophyto, visant à améliorer la connaissance des impacts des pesticides et à développer des outils innovants pour soutenir des pratiques agricoles plus durables.

Il convient de souligner que ce projet de thèse a été réalisé grâce à un financement partiel du plan Écophyto II+, couvrant 42 % d'une bourse doctorale complète, tandis que le complément salarial et les frais expérimentaux ont été pris en charge par la Région Centre-Val de Loire. Ce cofinancement illustre la capacité à mobiliser des ressources complémentaires pour répondre à une problématique prioritaire, tout en contribuant à la formation d'une doctorante sur ces enjeux scientifiques et à l'établissement de partenariats durables avec les acteurs de terrain, en vue de réduire l'usage des pesticides dans les agroécosystèmes.

2. AXE 1 - DIVERSITE DES EFFETS SUBLETAUX SUR LE FORFICULE

2.1 Effets sur les comportements

Le premier axe de ce projet consistait à évaluer les effets sublétaux des pesticides sur le comportement et la physiologie du perce-oreille européen. Nous disposions déjà de résultats préliminaires montrant que certains pesticides modifient fortement la biologie de cette espèce. Par exemple, nos travaux sur la **deltaméthrine** – un insecticide de la famille des pyréthrinoïdes, largement utilisé en arboriculture – ont révélé que cette molécule altère certains comportements de soins maternels tout en stimulant la reproduction des femelles (Mauduit et al., 2021; Meunier et al., 2020). À l'inverse, le **pyriproxyfène**, un insecticide qui mime l'action d'une hormone clé chez les insectes (l'hormone juvénile), n'a montré aucun effet détectable sur ces traits (Merleau et al., 2022). Dans le cadre de ce premier axe de thèse, nous avons d'abord voulu compléter ces premiers résultats en menant une série d'expériences de plus grande ampleur sur une autre molécule emblématique de l'agriculture : le **glyphosate**.

Principal actif de plus de 450 herbicides à large spectre, le glyphosate est connu pour agir en inhibant l'EPSPS, une enzyme absente des animaux, ce qui avait initialement conduit à le considérer comme sûr pour ces derniers (Duke and Powles, 2008). Cependant, des études ont ensuite montré que l'exposition au glyphosate pouvait affecter le comportement, l'immunité et le développement de divers arthropodes, notamment via des effets indirects sur leur microbiote ou liés aux adjuvants présents dans les formulations (Defarge et al., 2023; Motta and Moran, 2020). Malgré ces observations, il restait incertain si ces effets pouvaient se généraliser à tous les organismes non-cibles. De plus, les populations géographiquement proches sont soumises à des

contraintes environnementales et anthropiques locales variées, susceptibles d'influencer leur sensibilité, leur résistance ou leur tolérance aux herbicides, ce qui pourrait (au moins en partie) expliquer certaines divergences rapportées dans la littérature.

Dans ce contexte, nous avons étudié les **effets du glyphosate (sous la forme de Roundup®), sur des perce-oreilles issus de six populations naturelles** afin de mieux comprendre comment l'exposition à ce produit influence leur physiologie, leur comportement et leur survie, et d'identifier d'éventuelles différences populationnelles dans ces réponses. Ces investigations constituent un enjeu majeur pour l'évaluation des risques écologiques liés aux herbicides et pour le développement de pratiques agricoles plus durables. Nos résultats ont montré des effets limités sur les comportements parentaux et les paramètres physiologiques étudiés, tant chez les mâles, les femelles et les juvéniles. **Pour les femelles et les juvéniles**, d'abord, nous les avons exposées à différentes concentrations de Roundup (inférieures, égales ou supérieures au dosage recommandé) et mesuré l'expression de soins maternels (regroupement des œufs, soins aux œufs et aux jeunes, défense), ainsi que leur toilette, leur activité locomotrice et les caractéristiques des jeunes produits (temps de développement, taille, poids). Nous avons également exposé des juvéniles à une solution témoin ou au Roundup et mesuré leur locomotion, l'expression de gènes impliqués dans leur développement (voie de l'hormone juvénile) et leur survie après infection par un champignon pathogène. Dans l'ensemble, nos résultats n'ont révélé **aucun effet significatif du Roundup sur les paramètres étudiés**, suggérant que, chez cette espèce, une exposition directe à un herbicide à base de glyphosate ne modifie pas nécessairement les traits comportementaux, physiologiques ou développementaux. Cette étude a été publiée dans le journal *Ecotoxicology* (Pasquier et al., 2025b).

Pour les mâles, nous avons exposé les individus à trois conditions : une solution témoin, une dose de glyphosate formulé (Roundup®) cinq fois inférieure à la dose recommandée pour les cultures, et la dose recommandée. Vingt-quatre heures plus tard, nous avons mesuré leur activité, leur témérité et leur tendance à l'agrégation, puis nous les avons soumis à une infection par un champignon entomopathogène, en suivant leur survie pendant six semaines et en évaluant la réponse immunitaire des survivants. Nos résultats ont montré un **effet dose-dépendant sur l'activité générale** (Fig. 7) : chez les mâles exposés à la faible dose, l'activité augmentait avec le poids corporel, tandis qu'aucune relation comparable n'a été détectée dans les groupes témoin et forte dose. En revanche, aucune variation significative n'a été observée pour l'agrégation, la témérité ou les traits immunitaires mesurés après exposition au champignon. Ces résultats se sont révélés globalement cohérents entre les six populations testées, bien que des différences spécifiques aux populations aient été détectées pour la plupart des traits mesurés chez les mâles. Cette étude a été publiée dans *Environmental Science and Pollution Research* (Pasquier et al., 2024)

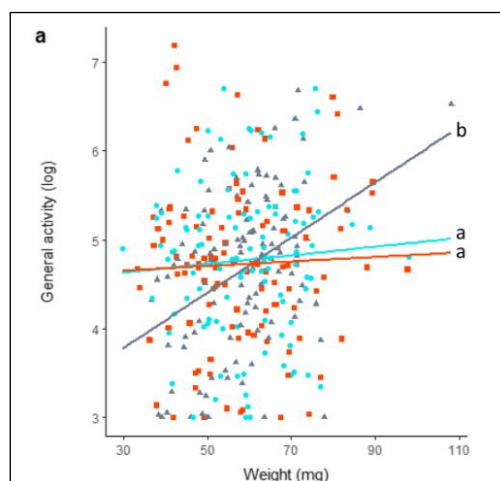
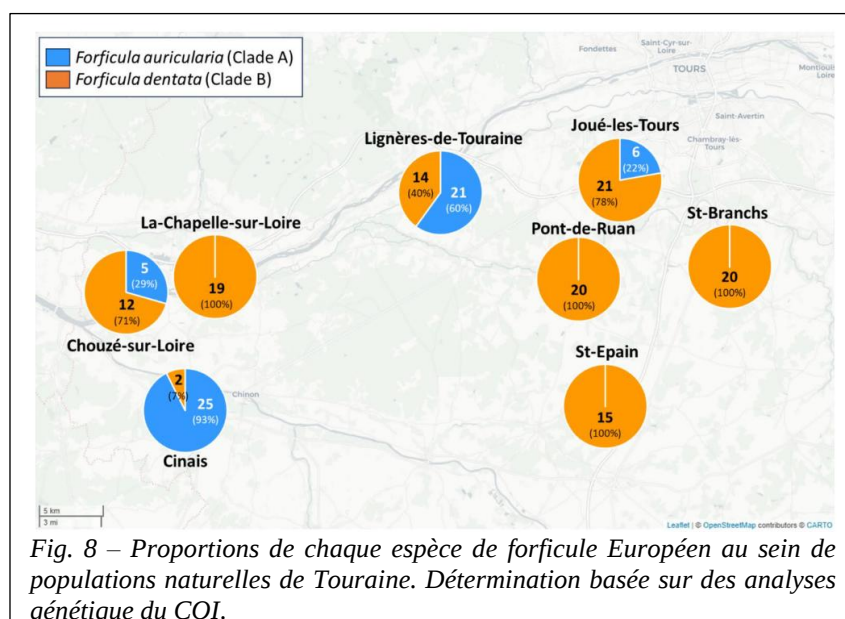


Fig. 7 – L'exposition à une dose intermédiaire de glyphosate (gris) induit un lien positif entre poids et activité des mâles.

Ces résultats confirment qu'à court terme, le glyphosate a un impact limité sur les traits étudiés chez le perce-oreille. En particulier, il n'altère ni les comportements maternels ni le développement des jeunes, deux fonctions essentielles à la résilience des populations et au maintien des services écosystémiques en vergers. Fait marquant, l'absence d'effets phénotypiques observée chez le forficule suggère une certaine robustesse face à ce type de stress. Cette résilience pourrait constituer un atout majeur à valoriser dans une stratégie de lutte biologique, ouvrant la voie à de nouvelles études visant à confirmer et exploiter ce potentiel. Ces perspectives s'inscrivent pleinement dans l'objectif de réduction de l'usage des produits phytosanitaires et de développement de solutions alternatives pour une agriculture plus durable.

En plus de montrer que l'exposition au glyphosate a des effets directs limités sur les comportements et la physiologie des perce-oreilles, nos travaux ont révélé une **variabilité notable de ces traits entre les populations étudiées** (Pasquier et al., 2024), soulevant la question de son origine. Cette variabilité ne peut s'expliquer par les conditions expérimentales, puisque tous les individus ont été maintenus dans des conditions standard plusieurs mois avant le début de nos expériences. De la même manière, ces différences apparaissent à très petite échelle géographique (50km) suggérant qu'elles ne peuvent être due à des conditions climatiques très différentes entre les populations. Nous n'avons pas non plus trouvé de lien entre les traits mesurés et les pratiques agricoles de populations échantillonnées, bien que la seule population non cultivée de l'étude se distingue par certains traits. Une explication potentielle pourrait être que cette variabilité est due aux conditions locales dans lesquelles les individus ont grandi et/ou dans lesquelles leurs parents et ancêtres ont été exposés, en accord avec des travaux montrant que l'environnement larvaire peut influencer le comportement, la physiologie et la reproduction des adultes, et que les mères peuvent « programmer » leurs descendants face à des conditions défavorables (Kramer et al., 2015; Raveh et al., 2016). Une autre hypothèse était que cette variation soit due à la présence d'espèces cryptiques de perce-oreille européen, chacune présentant des traits spécifiques. Pour explorer cette possibilité, nous avons réalisé une étude complémentaire (Pasquier et al., 2025a) qui a confirmé par analyse de COI que cette **variabilité reposait sur la présence d'espèces cryptiques au sein du complexe de perce-oreille européen : *F. auricularia* et *F. dentata*** (Fig. 8). Dans cette étude, nous

avons montré que ces espèces diffèrent notamment par leurs stratégies reproductives : *F. dentata* privilégie l'investissement avant oviposition en retardant la ponte, améliorant la qualité des œufs et des jeunes mais réduisant le succès d'éclosion, tandis que *F. auricularia* investit davantage après l'oviposition, limitant la provision des œufs mais prolongeant le développement et



augmentant le taux d'éclosion. Ces différences, confirmées par des expériences de jardin commun, n'affectaient pas la majorité des comportements de soins maternels, bien que *F. dentata* montre une défense des œufs plus marquée.

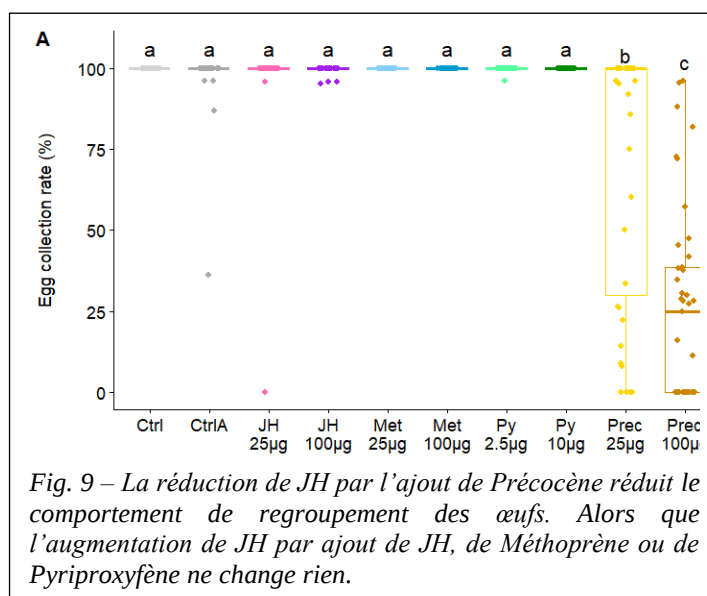
L'ensemble de ces résultats a ainsi mis en évidence l'importance de considérer la variabilité biologique naturelle, qu'elle soit intra- ou inter-populationnelle, ainsi que la présence d'espèces cryptiques, pour évaluer finement les effets sublétaux des pesticides. L'histoire écologique locale, les pressions environnementales et la diversité génétique pourraient moduler la sensibilité des individus aux pesticides, avec des implications majeures pour la résilience des populations et le maintien des services écosystémiques dans les agroécosystèmes.

2.2 Pesticides et risque de dérégulation hormonale des soins

Le deuxième objectif de l'axe 1 consistait à mieux comprendre les mécanismes physiologiques qui régulent certains comportements essentiels chez le perce-oreille, en particulier les soins maternels apportés aux œufs et aux jeunes. L'enjeu était de déterminer si, et comment, l'exposition aux pesticides pouvait perturber ces comportements de façon subtile, sans entraîner de mortalité directe. Cette démarche s'inscrit pleinement dans la logique du plan Écophyto, qui met l'accent sur l'anticipation des risques non intentionnels liés à l'usage des pesticides.

Pour cela, nous nous sommes intéressés au rôle de l'hormone juvénile (JH), connue pour réguler le comportement maternel chez plusieurs insectes, et dont de nombreux pesticides dits « régulateurs de croissance » (IGR) perturbe l'action. Nos résultats précédents, montrant l'absence d'effet du pyriproxyfène – un IGR agoniste de la JH – sur le comportement de soins maternels et sur le développement des œufs et des jeunes chez le perce-oreille (Merleau et al., 2022), soulevaient des questions fondamentales sur la régulation hormonale de la parentalité chez cet insecte. Cette question prend toute son importance dans un contexte agroécologique, où le perce-oreille constitue un auxiliaire précieux dans les vergers de fruits à pépin et où une exposition répétée à des produits chimiques pourrait induire des impacts subtils sur la physiologie et les comportements clés, même en l'absence d'effets létaux.

Dans une première étude (Pasquier, Meunier et Lécureuil, *under review*, A), nous avons manipulé expérimentalement les niveaux d'hormone juvénile (JH) chez 496 femelles de perce-oreille européens, en les exposant après oviposition soit à la JH naturelle (JHIII), soit à deux agonistes de la JH (Méthoprène et Pyriproxyfène), soit à un inhibiteur de production de JH (Précocène I). Nous avons ensuite quantifié l'impact de ces traitements sur trois comportements maternels clés : la collecte des œufs (Fig.9), la garde des



œufs et le toilettage des œufs. Nos résultats ont montré que l'inhibition de la synthèse de JH via le Précocène I réduisait significativement l'expression de ces trois comportements, confirmant le rôle positif de la JH dans le maintien des soins maternels après oviposition. Ces effets étaient spécifiques aux comportements parentaux, sans modification de l'activité générale, du toilettage personnel, de la masse corporelle des femelles, ni du développement des œufs ou du poids des nymphes à l'éclosion. L'analyse moléculaire a confirmé que le Précocène I réduisait l'expression de gènes clés de la voie JH, JHAMT et Kr-h1, tandis que les agonistes et la JHIII n'ont pas modifié cette expression. Ces résultats fournissent ainsi une preuve expérimentale et moléculaire que la JH est nécessaire au maintien des soins maternels.

Dans une seconde étude (Pasquier, Meunier et Lécureuil, *under review*, B), nous avons testé le rôle de l'hormone juvénile (JH) dans le déclenchement des soins aux œufs chez les femelles de perce-oreille. Les femelles avant ponte ont été exposées à la JH, à son analogue méthoprène, à l'inhibiteur de production Précocène, ou à un témoin (acétone), à différentes doses, et leur comportement envers des œufs étrangers a été observé. Les résultats ont montré qu'aucun traitement n'a induit les soins maternels ni empêché le cannibalisme des œufs. Ces observations ont montré que ni la présence de JH, ni celle des œufs ne suffit à déclencher la parentalité chez les femelles.

Les résultats de cette partie du travail de thèse de Laura Pasquier ont apporté des connaissances fondamentales sur la régulation hormonale des comportements maternels chez le perce-oreille européen et permettent également d'anticiper les effets sublétaux des régulateurs de croissance insecticides (IGR). Dans le contexte des pesticides, cette compréhension fine de la voie de l'hormone juvénile (JH) montre que les agonistes de la JH, tels que le méthoprène et le pyriproxyfène, sont peu susceptibles d'altérer les soins parentaux, tandis que les inhibiteurs de cette voie, comme le Précocène, pourraient perturber la parentalité et, par conséquent, affecter la survie des jeunes ainsi que la persistance des populations. Ces résultats fournissent un cadre prédictif solide pour évaluer et prévenir les effets indirects des pesticides sur les insectes auxiliaires, contribuant à la mise en place de pratiques agricoles plus durables.

3. RECHERCHE DE MULTI-BIOINDICATEURS D'EXPOSITION

Le deuxième axe de notre projet visait à **identifier des marqueurs moléculaires précoces** capables d'être utilisé pour détecter les perturbations induites par les pesticides avant qu'elles ne se traduisent par des effets visibles, et ainsi valider l'approche bioindicatrice. Jusqu'à présent, les approches classiques d'analyse des effets non-cibles des pesticides se concentraient principalement sur la survie ou la reproduction des insectes. Nos travaux présentés précédemment ont également étudié les conséquences phénotypiques des pesticides, mais en élargissant l'analyse à des traits d'histoire de vie moins fréquemment étudiés, tels que le comportement maternel, pourtant essentiel à la survie à long terme des espèces. Nous avons ainsi montré que, chez le perce-oreille européen, les effets du glyphosate et des IGR agonistes de la JH sur ces comportements étaient modérés.

Le deuxième objectif de la thèse de Laura Pasquier était donc d'explorer si des approches uniquement moléculaires, sans *a priori*, pouvaient offrir une sensibilité accrue dans la détection de modifications induites par l'exposition aux pesticides. Pour

cela, nous avons utilisé la spectrométrie de masse afin d'étudier l'impact de l'insecticide pyréthroïde, la deltaméthrine, sur le perce-oreille européen. Cette approche d'écotoxicoprotéomique ouvre la voie au développement, à plus long terme, d'outils capables de quantifier des biomarqueurs protéiques spécifiques d'exposition aux pesticides.

Dans cette étude, 63 femelles ont été exposées à la deltaméthrine soit avant leur première ponte, soit avant une éventuelle seconde ponte. Pour chaque traitement, les femelles ont été exposées pendant 4h à une dose sublétalement de deltaméthrine (6,875 ng/cm², soit environ 2,5 fois inférieure à la dose normalement appliquée dans les vergers) ou à un contrôle. Une semaine après l'exposition, certaines femelles ont été disséquées pour l'analyse protéomique, tandis que d'autres ont été suivies afin d'évaluer l'effet de la deltaméthrine sur la date de ponte et le nombre d'œufs produits, que ce soit lors de la première ou de la seconde ponte.

Cette approche expérimentale a permis de caractériser les réponses moléculaires des perce-oreilles à la deltaméthrine et de relier les modifications protéomiques observées à d'éventuelles conséquences sur la physiologie et la reproduction. Nos analyses ont révélé qu'une exposition sublétalement induisait une signature protéomique robuste (Fig. 10), comprenant 80 protéines dont 46 étaient surexprimées et 34 sous-exprimées, indépendamment du stade de reproduction. Ces protéines sont principalement impliquées dans la détoxification (par ex. NADPH-cytochrome P450 réductase, arginine kinase), le métabolisme énergétique, les réponses au stress et les processus neuronaux. Plusieurs d'entre elles, déjà identifiées comme biomarqueurs d'exposition dans d'autres modèles, pourraient constituer des indicateurs fiables pour le suivi des populations d'insectes non ciblés.

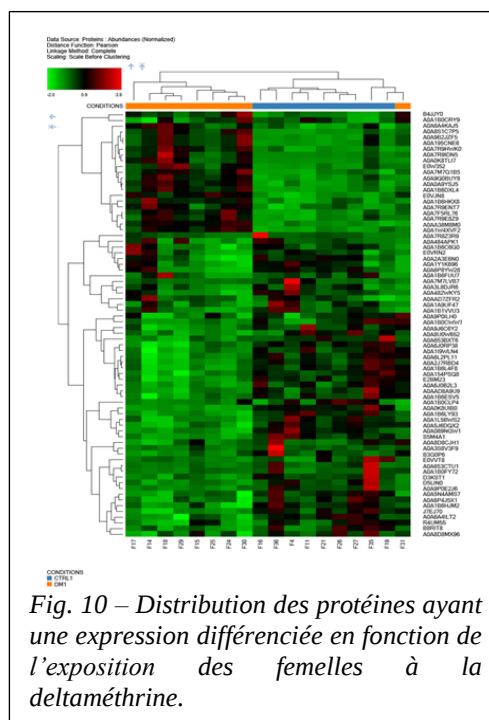


Fig. 10 – Distribution des protéines ayant une expression différenciée en fonction de l'exposition des femelles à la deltaméthrine.

Au-delà de cette réponse commune, des signatures spécifiques au stade physiologique ont également été mises en évidence. Avant la ponte, la deltaméthrine modulait préférentiellement des protéines et voies liées au calcium, à la neuroprotection et à l'immunité. Après la période de soins maternels, la réponse se déplaçait vers des ajustements métaboliques, endocriniens et neuronaux, notamment par l'activation de la voie GABAergique. Cette variabilité suggère que les contraintes physiologiques propres à chaque phase du cycle de vie influencent la sensibilité moléculaire aux contaminants.

En revanche, aucun effet n'a été observé sur les paramètres reproductifs mesurés (date de ponte, nombre d'œufs, production d'une seconde ponte), contrastant avec certains résultats obtenus précédemment. Ce décalage entre réponses moléculaires et traits phénotypiques souligne l'importance d'approches multi-échelles.

Dans l'ensemble, ce travail montre que la deltaméthrine perturbe profondément l'équilibre biologique de *F. auricularia* au niveau moléculaire, même en l'absence d'effets visibles sur la reproduction. L'analyse protéomique a révélé une signature moléculaire caractéristique, impliquant des protéines associées à la détoxification, au métabolisme énergétique, à la régulation du système nerveux et aux réponses au stress. Ces résultats confirment que l'écotoxicoprotéomique constitue un outil puissant pour détecter des perturbations cachées et développer des biomarqueurs pertinents afin d'évaluer les risques des pesticides pour les insectes auxiliaires et la biodiversité fonctionnelle. Un article détaillant ces résultats est actuellement en cours de rédaction.

Ces résultats démontrent le potentiel de l'écotoxicoprotéomique pour révéler les effets sublétaux précoces des pesticides et pour identifier des marqueurs communs d'exposition. Ils ouvrent des perspectives concrètes pour développer des outils de diagnostic utilisables en agroécologie, mieux évaluer les impacts réels des pesticides sur les auxiliaires, anticiper les risques pour la biodiversité fonctionnelle et accompagner l'évolution des pratiques agricoles dans le cadre du plan Écophyto.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce projet, financé par le plan **Écophyto II+** et la **Région Centre-Val de Loire**, a permis d'avancer significativement dans la compréhension des effets sublétaux des pesticides sur le perce-oreille européen (*Forficula auricularia*), un auxiliaire majeur en verger. Nos travaux montrent que, même à faibles doses, les insecticides peuvent induire des perturbations biologiques notables, souvent indétectables au niveau comportemental mais révélées par l'analyse protéomique. L'identification de biomarqueurs protéiques robustes constitue ainsi une approche prometteuse pour évaluer précocement l'impact des produits phytosanitaires sur les populations d'auxiliaires et, plus largement, sur les services écosystémiques qu'ils assurent.

Au-delà des résultats scientifiques, ce projet a permis la **formation d'une doctorante hautement qualifiée**, spécialisée en écotoxicologie, biologie des insectes et protéomique, renforçant ainsi les compétences disponibles pour analyser et anticiper les impacts des contaminants. La thèse de Laura Pasquier, débutée en octobre 2022 à l'Université de Tours sous la codirection de Charlotte Lécureuil et Joël Meunier, a une date de soutenance prévue le 26 novembre 2025 (le dépôt du manuscrit de thèse étant prévu pour mi-septembre). Ce travail a été accompagnée par un **comité de suivi expert** composé d'Olivier Geffard (INRAE Villeurbanne), spécialiste du biomonitoring et des bioindicateurs, de Karine Monceau (Université de La Rochelle/CEBC), experte des impacts de l'agriculture sur la biodiversité, et de Romain Libbrecht (CNRS Tours), spécialiste de la génétique du comportement. Ce comité a garanti tout au long des trois ans du projet la qualité scientifique et l'orientation stratégique des travaux. Les résultats obtenus ont généré une **production scientifique particulièrement significative**, comprenant six publications en premier auteure (dont trois déjà parues, deux en cours de révision, et une en cours de rédaction), deux articles de revue en co-auteur, et sept communications orales lors de congrès nationaux et internationaux, renforçant la visibilité et l'impact scientifique du projet. Parallèlement, une attention particulière a été portée à la **diffusion auprès du grand public**, notamment via l'initiative *Ma thèse en BD* organisé par le SAPS (Sciences Avec et Pour la Société) de

l'université de Tours, pour lequel le sujet de Laura a reçu un prix, sa participation à une session de *Pint of Science*, ou les conférences grand publiques sur les perce-oreilles régulièrement donnés par Joël Meunier dans différents cadres associatifs. Cette diffusion souligne l'importance de la vulgarisation scientifique et de l'appropriation des résultats par la société. Ainsi, dans l'ensemble, cette thèse combine **avancée des connaissances sur les effets des pesticides, formation d'une jeune chercheuse et valorisation scientifique et sociétale**, contribuant de manière concrète et multidimensionnelle aux objectifs du plan Écophyto et à la promotion d'une agriculture plus durable.

En complément de la formation d'une doctorante, ce projet a permis d'**établir des partenariats solides avec des arboriculteurs et arboricultrices**, qui ont joué un rôle clé en fournissant un accès à des populations naturelles et en permettant d'intégrer les effets des pratiques de gestion. Ces collaborations ont également ouvert la voie à la **valorisation concrète du perce-oreille comme agent de lutte biologique**, contribuant à la réduction des intrants chimiques dans les vergers. Elles se poursuivent aujourd'hui avec pour objectif de **tester sur le terrain le potentiel de conservation et de renforcement de cet auxiliaire**, favorisant ainsi une approche agroécologique durable et opérationnelle.

Enfin, ce travail ouvre **des perspectives appliquées en écotoxicologie**, en particulier pour le **développement d'outils opérationnels basés sur les biomarqueurs protéiques**. Ces outils pourraient **détecter rapidement les effets sublétaux des pesticides**, avant que des impacts irréversibles ne se manifestent au niveau des populations ou des agroécosystèmes, offrant ainsi un levier concret pour une **gestion proactive et durable des pratiques phytosanitaires**.

En résumé, ce projet a :

- Avancé significativement la compréhension scientifique des effets sublétaux des pesticides sur un auxiliaire majeur des vergers, le perce-oreille européen, en montrant que des perturbations biologiques peuvent survenir même à faibles doses et être détectées précocement grâce à des biomarqueurs protéiques. Cette approche permet de mieux anticiper les risques pour les populations d'insectes auxiliaires et les services écosystémiques qu'ils assurent.
- Contribué à la formation d'une doctorante hautement qualifiée, renforçant les compétences disponibles en écotoxicologie, biologie des insectes et protéomique, et préparant ainsi de futures expertises pour évaluer et prévenir les impacts des contaminants chimiques.
- Renforcé les partenariats avec les acteurs de terrain, en particulier les arboriculteurs et arboricultrices, permettant l'accès à des populations naturelles, l'intégration des pratiques de gestion agricole et l'évaluation du potentiel du perce-oreille comme agent de lutte biologique. Ces collaborations favorisent une application concrète des résultats et soutiennent la réduction des intrants chimiques, en cohérence avec la démarche agroécologique promue par le plan Écophyto.
- Permis la diffusion scientifique et sociétale des connaissances, à travers publications, communications en congrès, initiatives de vulgarisation (Ma thèse en BD, Pint of Science) et conférences grand public, contribuant à l'appropriation

des résultats par la société et à la sensibilisation aux enjeux de l'agriculture durable.

- Ouvert des perspectives appliquées pour l'écotoxicologie, en développant des outils opérationnels basés sur les biomarqueurs protéiques, capables de détecter précocement les effets sublétaux et d'anticiper les impacts potentiels sur les populations et les agroécosystèmes.

Ainsi, **ce projet illustre pleinement les objectifs du plan Écophyto II+** en combinant la génération de connaissances nouvelles, la formation d'une jeune chercheuse, l'innovation méthodologique, le partenariat avec les acteurs de terrain et la promotion d'une agriculture durable respectueuse de la biodiversité fonctionnelle. Ces acquis constituent un **socle solide pour soutenir la réduction de l'usage des pesticides**, protéger les populations d'insectes auxiliaires et garantir la résilience des agroécosystèmes. Ils démontrent également la pertinence du cofinancement national et régional dans le cadre du plan Écophyto, qui permet de répondre efficacement à des enjeux de recherche appliquée tout en favorisant la transition agroécologique.

Références :

- Aktar, W., Sengupta, D., Chowdhury, A., 2009. Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdiscip. Toxicol.* 2, 1–12. <https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7>
- Defarge, N., Otto, M., Hilbeck, A., 2023. A Roundup herbicide causes high mortality and impairs development of *Chrysoperla carnea* (Stephens) (Neuroptera: Chrysopidae). *Sci. Total Environ.* 865, 161158. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161158>
- Dib, H., Jamont, M., Sauphanor, B., Capowiez, Y., 2011. Predation potency and intraguild interactions between generalist (*Forficula auricularia*) and specialist (*Episyrphus balteatus*) predators of the rosy apple aphid (*Dysaphis plantaginea*). *Biol. Control* 59, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.07.012>
- Duke, S.O., Powles, S.B., 2008. Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. *Pest Manag. Sci.* 64, 319–325. <https://doi.org/10.1002/ps.1518>
- Fountain, M.T., Harris, A.L., 2015. Non-target consequences of insecticides used in apple and pear orchards on *Forficula auricularia* L. (Dermaptera: Forficulidae). *Biol. Control* 91, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.07.007>
- Gouveia, D., Almunia, C., Cogne, Y., Pible, O., Degli-Esposti, D., Salvador, A., Cristobal, S., Sheehan, D., Chaumot, A., Geffard, O., Armengaud, J., 2019. Ecotoxicoproteomics: A decade of progress in our understanding of anthropogenic impact on the environment. *J. Proteomics* 198, 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2018.12.001>
- Guedes, R.N.C., Smagghe, G., Stark, J.D., Desneux, N., 2016. Pesticide-Induced Stress in Arthropod Pests for Optimized Integrated Pest Management Programs. *Annu. Rev. Entomol.* 61, 43–62. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-010715-023646>
- Kramer, J., Thesing, J., Meunier, J., 2015. Negative association between parental care and sibling cooperation in earwigs: a new perspective on the early evolution of family life? *J. Evol. Biol.* 28, 1299–1308. <https://doi.org/10.1111/jeb.12655>
- Le Navenant, A., Siegwart, M., Maugin, S., Capowiez, Y., Rault, M., 2019. Metabolic mechanisms and acetylcholinesterase sensitivity involved in tolerance to chlorpyrifos-ethyl in the earwig *Forficula auricularia*. *Chemosphere* 227, 416–424. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.065>
- Lordan, J., Alegre, S., Moerkens, R., Sarasúa, M.-J., Alins, G., 2015. Phenology and interspecific association of *Forficula auricularia* and *Forficula pubescens* in apple orchards. *Span. J. Agric. Res.* 13, e1003. <https://doi.org/10.5424/sjar/2015131-6814>

- Malagnoux, L., Capowiez, Y., Rault, M., 2014. Tissue distribution, characterization and *in vitro* inhibition of B-esterases in the earwig *Forficula auricularia*. *Chemosphere* 112, 456–464. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.05.003>
- Mauduit, E., Lécureuil, C., Meunier, J., 2021. Sublethal exposure to deltamethrin stimulates reproduction and has limited effects on post-hatching maternal care in the European earwig. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 39501–39512. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13511-7>
- Merleau, L.-A., Larrigaldie, I., Bousquet, O., Devers, S., Keller, M., Lécureuil, C., Meunier, J., 2022. Exposure to pyriproxyfen (juvenile hormone agonist) does not alter maternal care and reproduction in the European earwig. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29, 72729–72746. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20970-z>
- Meslin, C., Bozzolan, F., Braman, V., Chardonnet, S., Pionneau, C., François, M.C., Severac, D., Gadenne, C., Anton, S., Maibèche, M., Jacquin-Joly, E., Siaussat, D., 2021. Sublethal exposure effects of the neonicotinoid clothianidin strongly modify the brain transcriptome and proteome in the male moth *Agrotis ipsilon*. *Insects* 12, 1–19. <https://doi.org/10.3390/insects12020152>
- Meunier, J., Dufour, J., Van Meyel, S., Rault, M., Lécureuil, C., 2020. Sublethal exposure to deltamethrin impairs maternal egg care in the European earwig *Forficula auricularia*. *Chemosphere* 258, 127383. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127383>
- Moerkens, R., Gobin, B., Peusens, G., Helsen, H., Hilton, R., Dib, H., Suckling, D.M., Leirs, H., 2011. Optimizing biocontrol using phenological day degree models: the European earwig in pipfruit orchards. *Agric. For. Entomol.* 13, 301–312. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2011.00525.x>
- Motta, E.V.S., Moran, N.A., 2020. Impact of Glyphosate on the Honey Bee Gut Microbiota: Effects of Intensity, Duration, and Timing of Exposure. *mSystems* 5, e00268-20. <https://doi.org/10.1128/mSystems.00268-20>
- Orpet, R.J., Crowder, D.W., Jones, V.P., 2019. Biology and Management of European Earwig in Orchards and Vineyards. *J. Integr. Pest Manag.* 10, 21. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmz019>
- Pasquier, L., Dupont, S., Devers, S., Lécureuil, C., Meunier, J., 2025a. Alternative reproductive strategies in two cryptic species of the European earwig complex. *Sci. Nat.* 112, 48. <https://doi.org/10.1007/s00114-025-01999-9>
- Pasquier, L., Groutsch, J., Verger, M., Wallart, V., Meunier, J., Lécureuil, C., 2025b. Exposure to a glyphosate-based herbicide does not alter maternal care and offspring quality in the European earwig. *Ecotoxicology*. <https://doi.org/10.1007/s10646-025-02912-w>
- Pasquier, L., Lécureuil, C., Meunier, J., 2024. Limited effects of a glyphosate-based herbicide on the behaviour and immunity of males from six populations of the European earwig. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 31, 44205–44217. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34063-6>
- Raveh, S., Vogt, D., Kölliker, M., 2016. Maternal programming of offspring in relation to food availability in an insect (*Forficula auricularia*). *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 283, 20152936. <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.2936>
- Sauphanor, B., Sureau, F., 1993. Aggregation behaviour and interspecific relationships in Dermaptera. *Oecologia* 96, 360–364. <https://doi.org/10.1007/BF00317506>
- Schowalter, T.D., Noriega, J.A., Tscharntke, T., 2018. Insect effects on ecosystem services—Introduction. *Basic Appl. Ecol.* 26, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2017.09.011>
- Zhang, C., Shi, Q., Li, T., Cheng, P., Guo, X., Song, X., Gong, M., 2021. Comparative proteomics reveals mechanisms that underlie insecticide resistance in *Culex pipiens pallens* Coquillett. *PLoS Negl. Trop. Dis.* 15, e0009237. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0009237>
- Zouré, A.A., Serteyn, L., Somda, Z., Badolo, A., Francis, F., 2020. Proteomic Investigation on *Anopheles gambiae* in Burkina Faso Related to Insecticide Pressures from Different Climatic Regions. *Proteomics* 20. <https://doi.org/10.1002/pmic.201900400>

Note importante

*Cette partie peut être rendue sous forme non modifiable (fichier PDF de préférence).
Son format est laissé à la libre appréciation de ses rédacteurs.*

Annexe : textes des publications

Dans le cadre de la science ouverte, toutes nos publications sont (ou seront) disponibles au format *Green Open Access* sur le site de dépôt HAL. Les liens

☐ Publications scientifiques parues

#1 - Pasquier L, Groutsch J, Verger M, Wallart V, Meunier J* and Lécureuil C* (2025). Exposure to a glyphosate-based herbicide does not alter maternal care and offspring quality in the European earwig. *Ecotoxicology*, *in press*. (*co-last authors)
<https://doi.org/10.1007/s10646-025-02912-w>

#2 - Pasquier L, Dupont S, Devers S, Lécureuil C* and Meunier J* (2025). Alternative reproductive strategies in two cryptic species of the European earwig complex. *The science of Nature*, 112 (4): 48 (*co-last authors)
<https://doi.org/10.1007/s00114-025-01999-9>
<https://univ-tours.hal.science/hal-05104663> (Green Open Access)

#3 - Honorio, RM, Cheutin MC, Pasquier L, de Wever S, Perdereau E, Villalta I, Lécureuil C and Meunier J. (2025) The European earwig: A model species for studying the (early) evolution of social life. *Insectes Sociaux* 72 (2): 177-92.
<https://doi.org/10.1007/s00040-024-00985-0>
<https://univ-tours.hal.science/hal-04666215> (Green Open Access)

#4 - Pasquier L, Lécureuil C*, and Meunier J* (2024). Limited effects of a glyphosate-based herbicide on the behaviour and immunity of males from six populations of the European earwig. *Environmental Science and Pollution Research* 31: 44205-44217. (*co-last authors)
<https://doi.org/10.1007/s11356-024-34063-6>
<https://univ-tours.hal.science/hal-04628023> (Green Open Access)

#5 - Merleau LA, Larrigaldie I, Bousquet O, Devers S, Keller M, Lécureuil C*, and Meunier J* (2022). Exposure to pyriproxyfen (juvenile agonist) does not alter maternal care and reproduction in the European earwig. *Environmental Science and Pollution Research* 29 (48): 72729-72746. (*co-last authors)
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-20970-z>
<https://hal-univ-tours.archives-ouvertes.fr/hal-03678045> (Green Open Access)

☐ Publications scientifiques à paraître

#6 - Pasquier L, Wallart V, Devers S, Meunier J* and Lécureuil C* (*under revision*). Juvenile hormone and maternal egg care in the European earwig (Part I): neither the manipulation of JH, agonist, nor Precocene triggers the onset of care. *Under revision in Hormones and Behavior* (*co-last authors)

#7 - Pasquier L, Wallart V, Louis Audebert, Devers S, Meunier J* and Lécureuil C* (*under revision*). Juvenile hormone and maternal egg care in the European earwig (Part II): Exposure to precocene I reduces care behaviour in post-oviposition females. *Under revision in Hormones and Behavior* (*co-last authors)

☐ **Publications scientifiques prévues**

#8 - Pasquier L, Thomas D, Labas V, Teixeira AP, Meunier J* and Lécureuil C*. Sub-lethal exposure to deltamethrin alters earwig brain proteome across reproductive stages.

