



<http://portaildoc.univ-lyon1.fr>

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2025 - Thèse n°158

PESTICIDES AU SENS LARGE : QUELLES CONSEQUENCES SUR LA BIOLOGIE ET LE RÔLE ÉCOLOGIQUE DES ARAIGNÉES ARANEOMORPHES ?

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 18 décembre 2025
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

DENIS Clément

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2025 - Thèse n°158

PESTICIDES AU SENS LARGE : QUELLES CONSEQUENCES SUR LA BIOLOGIE ET LE RÔLE ÉCOLOGIQUE DES ARAIGNÉES ARANEOMORPHES ?

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 18 décembre 2025
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

DENIS Clément

Liste des enseignants du campus vétérinaire de Lyon (20/11/2025)

NOM	Prénom	Statut
ABITBOL	Marie	Professeur
ALVES DE OLIVEIRA	Laurent	Maître de conférences
ARCANGIOLI	Marie-Anne	Professeur
AYRAL	Florence	Maître de conférences
BARRETT	Laura	Maître de conférences
BECKER	Claire	Professeur
BELLUCO	Sara	Professeur
BENAMOU - SMITH	Agnès	Maître de conférences
BERNY	Philippe	Professeur
BLONDEL	Margaux	Maître de conférences
BONNET	Jeanne-Marie	Professeur Émérite
BOURGOIN	Gilles	Maître de conférences
BRASSARD	Colline	Maître de conférences
BRUTO	Maxime	Maître de conférences
BRUYERE	Pierre	Professeur
BUFF	Samuel	Professeur
BURONFOSSE	Thierry	Professeur
CACHON	Thibaut	Maître de conférences
CADORE	Jean-Luc	Professeur Émérite
CALLAIT-CARDINAL	Marie-Pierre	Professeur
CANNON	Leah	Maître de conférences
CHABANNE	Luc	Professeur
CHALVET-MONFRAY	Karine	Professeur
CHANOIT	Guillaume	Professeur
CHETOT	Thomas	Maître de conférences
DE BOYER DES ROCHES	Alice	Professeur
DELIGNETTE-MULLER	Marie-Laure	Professeur
DJELOUADJI	Zorée	Professeur
ESCRIOU	Catherine	Maître de conférences
GALIA	Wessam	Maître de conférences
GILLET	Benoit	Maître de conférences
GILOT	Emmanuelle	Professeur
GONTHIER	Alain	Maître de conférences
HUGONNARD	Marine	Maître de conférences
HUMBERT	Alexandre	Maître de conférences Stagiaire
JUNOT	Stéphane	Professeur
KHOSH NEVIS	Mehrdad	Maître de conférences
KIM	Mark	Maître de conférences Stagiaire
KODJO	Angeli	Professeur
KRAFFT	Émilie	Maître de conférences
LAABERKI	Maria-Halima	Professeur
LE GRAND	Dominique	Professeur
LEBLOND	Agnès	Professeur
LEDOUX	Dorothée	Maître de conférences
LEFEBVRE	Sébastien	Maître de conférences
LEGROS	Vincent	Maître de conférences
LEPAGE	Olivier	Professeur
LOUZIER	Vanessa	Professeur

LURIER	Thibaut	Maître de conférences
MAGNIN	Mathieu	Maître de conférences
MARCHAL	Thierry	Professeur
MOSCA	Marion	Maître de conférences
MOUNIER	Luc	Professeur
PEROZ	Carole	Maître de conférences
PIN	Didier	Professeur
PONCE	Frédérique	Professeur
PORPHYRE	Thibaud	Professeur Stagiaire
PORSMOQUER	Charles	Maître de conférences Stagiaire
PORTIER	Karine	Professeur
POUZOT-NEVORET	Céline	Professeur
PROUILLAC	Caroline	Professeur
RACHED	Antoine	Maître de conférences
REMY	Denise	Professeur
RENE MARTELLET	Magalie	Maître de conférences
ROGER	Thierry	Professeur
SAWAYA	Serge	Maître de conférences
SCHRAMME	Michaël	Professeur
SERGEANTET	Delphine	Professeur
STORCK	Fanny	Professeur
TORTEREAU	Antonin	Maître de conférences
VICTONI	Tatiana	Maître de conférences
ZENNER	Lionel	Professeur

Remerciements au jury

A Monsieur le Docteur Sébastien LEFEBVRE,

De VetAgro Sup, campus vétérinaire de Lyon,

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury de thèse,

Tous mes hommages les plus respectueux.

A Monsieur le Professeur Philippe BERNY,

De VetAgro Sup, campus vétérinaire de Lyon,

Pour vos cours d'écotoxicologie m'ayant inspiré l'idée de ce sujet de thèse,

Pour m'avoir fait l'honneur d'encadrer ce travail passionnant,

Pour votre implication et votre accompagnement,

Mes remerciements les plus enthousiastes.

A Monsieur le Professeur Lionel ZENNER,

De VetAgro Sup, campus vétérinaire de Lyon,

Pour m'avoir fait l'honneur de prendre part à ce jury de thèse,

Pour votre intérêt pour l'entomologie et l'arachnologie,

Mes plus sincères remerciements.

Table des matières

Liste des figures	11
Liste des tableaux	13
Liste des abréviations.....	15
Introduction	17
Partie 1 : Notions principales sur les araignées et les pesticides	19
I. Biologie et rôle écologique des araignées aranéomorphes	19
1. Classification phylogénétique et anatomie.....	19
a. La classe des Arachnides (Arachnida).....	19
b. L'ordre des Araignées (Araneae)	20
c. L'infra-ordre des Aranéomorphes (Araneomorphae).....	21
2. Principales méthodes de capture des proies	26
a. Capture passive à l'aide d'un piège : la toile	26
i. Soies et formation des fils	26
ii. Différents types de toiles	28
b. Capture sans piège : active à l'approche ou passive à l'affût	29
3. Reproduction et croissance des araignées	30
a. Préparation, rapprochement et accouplement	30
b. Formation du cocon, éclosion et développement	32
4. Rôle écologique des araignées	34
a. Des habitats variés	34
b. La régulation des proies.....	36
c. Les prédateurs des araignées.....	36
5. Les familles d'araignées aranéomorphes fréquemment étudiées	38
a. Comment trouver et capturer des araignées afin de les étudier ?	38
b. Exemples de familles d'araignées aranéomorphes tissant des toiles	39
i. Toiles orbiculaires : les Araneidae et les Tetragnathidae.....	39
ii. Toiles en nappe : les Linyphiidae	42
iii. Toiles en dôme ou irrégulières : les Theridiidae	43
iv. Toiles en entonnoir : les Agelenidae.....	44
c. Exemples de familles d'araignées aranéomorphes pratiquant la chasse à l'approche	45
i. Les Salticidae.....	45
ii. Les Lycosidae	47
iii. Les Philodromidae.....	48
d. La principale famille d'araignées aranéomorphes chassant à l'affût : les Thomisidae	49

II. Notions générales concernant les pesticides pouvant avoir un impact sur les araignées aranéomorphes	51
1. Catégorisation des pesticides selon leur site d'application	51
a. Les pesticides employés sur les végétaux : les produits phytosanitaires	52
b. Les pesticides employés sur les animaux : les produits antiparasitaires vétérinaires	54
c. Les pesticides employés sur des surfaces inertes ou directement sur les organismes nuisibles : les biocides	55
2. Impact écologique des pesticides et réglementation.....	57
a. Toxicité et devenir des pesticides dans l'environnement.....	57
b. Réglementation des pesticides et autorisation de mise sur le marché	60
i. AMM des produits phytosanitaires.....	60
ii. AMM des médicaments antiparasitaires vétérinaires	62
iii. AMM des produits biocides	62
iv. Réglementations internationales sur la gestion des pesticides et sur l'interdiction des substances les plus problématiques.....	64
v. Problématiques récentes et futures concernant la réglementation des pesticides en France	65
3. Principaux pesticides ayant fait l'objet d'études en lien avec les araignées aranéomorphes	66
a. Pesticides ciblant des arthropodes : insecticides et acaricides.....	66
i. Insecticides et acaricides dont le mécanisme d'action est en lien avec l'acétylcholine.....	67
ii. Insecticides et acaricides perturbant le fonctionnement des canaux sodiques voltage-dépendants.....	71
b. Pesticides ciblant des organismes végétaux : les herbicides	73
Partie 2 : Conséquences de l'exposition des araignées aranéomorphes aux pesticides.....	77
I. Modalités d'exposition des araignées aux pesticides	77
1. Exposition environnementale passive des araignées aux pesticides	77
a. Contamination topique directe par pulvérisation de pesticides	77
b. Contamination par exposition aux résidus de pesticides présents dans l'environnement	78
c. Contamination par accumulation de substances toxiques sur les toiles des araignées.....	80
2. Exposition active des araignées par prédation de proies contaminées	80
3. Détection et détoxification des pesticides	81
II. Effets des pesticides sur les araignées aranéomorphes	83
1. Effet létal : mortalité des araignées par intoxication.....	83
a. Expositions favorisant la survenue de l'effet létal	83

b. Principaux pesticides ayant un effet létal sur les araignées	84
c. Facteurs modulant la létalité des pesticides.....	85
2. Effets sublétaux : modifications comportementales et physiologiques non létales ..	87
a. Altération de la mobilité.....	87
b. Atteinte de la capacité à tisser des toiles fonctionnelles.....	89
c. Altération de la capacité de capture des proies.....	91
d. Perturbation du comportement reproducteur des adultes et du développement des jeunes	92
e. Autres effets sublétaux	94
3. Effets indirects : action des pesticides sur les proies des araignées et sur leur milieu de vie	95
a. Raréfaction des proies et diminution de leur qualité nutritionnelle	95
b. Raréfaction des végétaux et altération du milieu de vie des araignées	95
4. Effets variables, méconnus ou sous-estimés nécessitant la poursuite d'études toxicologiques	96
a. L'hormèse : stimulation des araignées exposées à de faibles doses de pesticides.....	96
b. Perspectives et sujets d'études à approfondir.....	97
Partie 3 : Conséquences écologiques de l'exposition des araignées aux pesticides et apport de leur étude dans la surveillance et la lutte contre la pollution environnementale.....	103
I. Déséquilibres écosystémiques consécutifs à l'exposition des araignées aux pesticides.....	103
1. Croissance des populations d'arthropodes nuisibles pourtant initialement ciblés par les pesticides.....	103
2. Vers un potentiel déclin des espèces prédatrices d'araignées ?.....	104
II. Utilisation des araignées en tant qu'espèces sentinelles de la pollution environnementale, causée ou non par des pesticides.....	106
1. Les araignées des zones ripariennes, sentinelles permettant la surveillance des taux de substances PBT dans l'environnement	106
a. Définition d'une espèce sentinelle et particularités des zones ripariennes	106
b. Surveillance des polluants organiques persistants par les araignées.....	107
c. Surveillance des éléments-traces métalliques et du méthylmercure par les araignées.....	108
2. Des études sont nécessaires afin d'étendre ce rôle de sentinelle à des araignées vivant dans d'autres milieux, ainsi qu'à la surveillance des pesticides	110
a. L'utilisation de toiles d'araignées en tant que bioindicateurs de la pollution de l'air.....	110
b. Vers l'établissement des araignées en tant qu'espèces sentinelles des taux de pesticides dans l'environnement ?	111

III. L'étude des araignées pourrait tisser la voie vers des pratiques agricoles limitant l'utilisation de pesticides particulièrement nocifs pour l'environnement	113
1. Adapter les pratiques agricoles pour diminuer l'utilisation de pesticides et favoriser l'abondance et la diversité des populations d'araignées.....	113
2. L'utilisation de toxines peptidiques issues de venins d'araignées en tant que bioinsecticides spécifiques	115
Conclusion	117
Bibliographie	121

Liste des figures

Figure 1 : Proposition d'arbre phylogénétique du sous-embranchement des Chélicérates ..	19
Figure 2 : Représentation schématique des mouvements des chélicères chez les mygalomorphes et chez les aranéomorphes	21
Figure 3 : Anatomie externe d'une araignée aranéomorphe mâle, vue dorsale.....	22
Figure 4 : Anatomie externe d'une araignée aranéomorphe femelle, vue ventrale.....	23
Figure 5 : Anatomie interne d'une araignée aranéomorphe femelle, coupe sagittale	23
Figure 6 : Extrémité d'une patte locomotrice d'une araignée présentant des soies adhésives, en microscopie électronique à balayage	25
Figure 7 : Fonctions des fils de soie produits par les sept types de glandes séricigènes de l'épeire diadème (<i>Araneus diadematus</i>)	27
Figure 8 : Organisation de l'appareil reproducteur chez les femelles haplogynes et entélegynes.....	31
Figure 9 : Comportements maternels chez les Lycosidae.....	32
Figure 10 : Croissance des araignées : éclosion et mues.....	33
Figure 11 : Respiration aquatique de l'argyronète (<i>Argyroneta aquatica</i>).....	35
Figure 12 : Exemples d'espèces prédatrices, parasitoïdes et parasites ciblant exclusivement les araignées.....	37
Figure 13 : Exemples d'Araneidae communément rencontrées en France	40
Figure 14 : Une Tetragnathidae au centre de sa toile inclinée	41
Figure 15 : Toile en nappe et cohabitation chez les Linyphiidae	42
Figure 16 : Les Theridiidae, entre « fausses-veuves » et « veuves ».....	43
Figure 17 : Agelenidae communes de nos jardins et habitations	44
Figure 18 : Diversité au sein de la grande famille des araignées sauteuses (Salticidae).....	46
Figure 19 : Les Lycosidae, principales araignées chassant au sol.....	48
Figure 20 : Philodromidae camouflée parmi le lichen.....	49
Figure 21 : Chasse à l'affût et variation de couleur chez les Thomisidae	50
Figure 22 : Proposition de catégorisation des pesticides selon leur site d'application	51
Figure 23 : Evolution et quantification de l'utilisation mondiale des produits phytosanitaires	53
Figure 24 : Transfert et dégradation des pesticides dans l'environnement.....	59
Figure 25 : Bioaccumulation de substances persistantes, bioaccumulables et toxiques (PBT) par bioamplification dans le réseau trophique	60
Figure 26 : Organismes intervenant dans la délivrance des autorisations de mise sur le marché (AMM) des pesticides à l'échelle européenne et à l'échelle nationale	63
Figure 27 : Représentation schématique simplifiée du rôle physiologique de l'acétylcholine dans la communication nerveuse au niveau d'une synapse	67

Figure 28 : Représentation schématique simplifiée du mécanisme d'action des néonicotinoïdes	68
Figure 29 : Représentation schématique simplifiée du mécanisme d'action des organophosphorés et des carbamates	70
Figure 30 : Mécanisme d'action des pyréthriinoïdes et organochlorés	71
Figure 31 : Mécanismes de transfert des médicaments antiparasitaires canins dans divers milieux et espèces exposées aux résidus de ces pesticides	79
Figure 32 : Modulation de l'effet létal par des facteurs propres aux pesticides et aux araignées	86
Figure 33 : Altération de la mobilité suite à une exposition résiduelle de pesticides chez des Lycosidae	88
Figure 34 : Altération de la capacité à tisser des toiles chez des araignées orbitèles	90
Figure 35 : Diminution de la fécondité de <i>Pardosa pseudoannulata</i> (Lycosidae) suite à leur exposition à des résidus de glyphosate avant leur maturité sexuelle	93
Figure 36 : Relation dose-réponse d'hormèse d'une araignée exposée à un pesticide	97
Figure 37 : Evolution de l'abondance des araignées en fonction de la pression en fongicide.....	99
Figure 38 : Déséquilibres écosystémiques consécutifs à l'exposition des araignées aux pesticides	105
Figure 39 : Bioamplification du mercure et du méthylmercure dans les réseaux trophiques des zones ripariennes	109

Liste des tableaux

Tableau I : Classification de l'OMS des pesticides en fonction des dangers qu'ils présentent	57
---	----

Liste des abréviations

2,4-D : Acide 2,4-dichlorophénoxyacétique

AMM : Autorisation de mise sur le marché

ANMV : Agence nationale du médicament vétérinaire

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

APE : Antiparasitaire externe

API : Antiparasitaire interne ; Vermifuge

CCE : Commission de coopération environnementale

DDT : Dichlorodiphényltrichloroéthane

DL50 : Dose létale médiane

ECHA : Agence européenne des produits chimiques (de l'anglais « *European Chemicals Agency* »).

EFSA : Autorité européenne de sécurité des aliments (de l'anglais « *European Food Safety Authority* »)

EMA : Agence européenne des médicaments (de l'anglais « *European Medicines Agency* »)

EPSPS : 5-énolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase

ESCCAP : Conseil scientifique européen sur les parasites des animaux de compagnie (de l'anglais « *European Scientific Counsel Companion Animal Parasites* »)

ETM : Éléments-traces métalliques ; « Métaux lourds »

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (de l'anglais « *Food and Agriculture Organization of the United Nations* »)

FEDIAF : Fédération Européenne de l'Industrie des Aliments pour Animaux Familiers

Hg : Mercure

INPN : Inventaire national du patrimoine naturel

INSEE, Insee : Institut national de la statistique et des études économiques

LMR : Limite maximale de résidus

MeHg : Méthylmercure

Mt : Mégatonne ; Million de tonnes

mV : Millivolt

NaV : (Canaux) sodiques voltage-dépendants

NRCCAMEH : Comité du conseil national de la recherche (États-Unis) sur l'utilisation des animaux en tant qu'indicateurs des dangers environnementaux (de l'anglais « *National Research Council (US) Committee on Animals as Monitors of Environmental Hazards* »)

OMS : Organisation mondiale de la Santé

OP : Organophosphorés

PBT : Substances persistantes, bioaccumulables et toxiques

PCB : Polychlorobiphényles ; Biphényles polychlorés

PCDD : Polychlorodibenzo-p-dioxines ; Dioxines

PCDF : Polychlorodibenzofuranes ; Furanes

POP : Polluant organique persistant

Ppm : Partie par million ; Un millionième

RCP : Résumé des caractéristiques du produit

SRC : Secrétariat de la convention de Rotterdam (de l'anglais « *Secretariat of the Rotterdam Convention* »)

SSC : Secrétariat de la convention de Stockholm (de l'anglais « *Secretariat of the Stockholm Convention* »)

UE : Union Européenne

INTRODUCTION

Présentes sur la quasi-totalité du globe, les araignées sont des prédateurs spécialisés essentiels à la régulation des populations d'arthropodes dans les écosystèmes. En 2017, il a été estimé que la consommation annuelle de l'intégralité des araignées mondiales était comprise entre 400 et 800 millions de tonnes de proies, témoignant du rôle capital de ces prédateurs dans le maintien des populations d'insectes. (Nyffeler & Birkhofer, 2017)

Tout comme de nombreuses espèces d'arthropodes, les araignées sont menacées par les activités anthropiques modifiant ou détruisant leur milieu de vie. En se focalisant sur une seule espèce ou sur l'ensemble des araignées dans un milieu, des études européennes récentes ont permis de constater le déclin alarmant des populations d'araignées. Par exemple, alors que les densités de population de l'épeire diadème (*Araneus diadematus*) en Suisse ont été divisées par 140 en un siècle, le nombre total d'araignées localisées dans un champ de luzerne hongrois a diminué de 45 % en 20 ans. (Nyffeler & Bonte, 2020; Samu et al., 2023)

Les pesticides au sens large, à usage agricole (produits phytosanitaires) ou domestique et professionnel (biocides et produits antiparasitaires vétérinaires), font partie des nombreuses menaces qui pèsent sur les araignées. Dans le contexte actuel de pollution environnementale par des substances persistantes, bioaccumulables et toxiques (PBT) tels que des pesticides, la survie et le rôle écologique des araignées dans leur écosystème sont compromis.

Cette thèse bibliographique a pour but d'exposer les différents effets des pesticides sur les araignées, en se focalisant notamment sur les araignées aranéomorphes, qui représentent près de 95 % des espèces d'araignées décrites. L'exclusion des espèces mygalomorphes se justifie par leurs habitats et modes de vies qui les exposent peu aux pesticides par rapport aux espèces aranéomorphes. (Rollard, 2021)

Suite à une présentation de notions générales concernant les araignées et les pesticides, ce travail expose les nombreux effets des pesticides sur les araignées identifiés dans les publications des dernières décennies, qu'ils soient létaux, sublétaux ou indirects. Enfin, face aux conséquences écologiques de l'utilisation de pesticides, les potentiels intérêts de l'étude des araignées dans la surveillance de la pollution environnementale et dans l'amélioration des pratiques agricoles sont présentés.

Dans l'ensemble de ce travail, le mot « pesticides » désigne implicitement les pesticides au sens large, regroupant les produits phytosanitaires (ou pesticides agricoles), les produits antiparasitaires vétérinaires et les biocides.

PARTIE 1 : NOTIONS PRINCIPALES SUR LES ARAIGNEES ET LES PESTICIDES

I. Biologie et rôle écologique des araignées aranéomorphes

1. Classification phylogénétique et anatomie

a. La classe des Arachnides (Arachnida)

Les araignées appartiennent à l'embranchement des Arthropodes. Leur corps divisé en segments est entouré d'un exosquelette, cuticule rigide, qu'elles renouvellent régulièrement pour grandir par le biais de mues. L'ordre des Araignées fait partie des 16 ordres appartenant à la classe des Arachnides, comprise dans le sous-embranchement des Chélicérates (**Figure 1**). A la différence des insectes, les arachnides n'ont ni antennes, ni ailes, et leur corps est divisé en deux parties :

- la région antérieure, qui consiste en une fusion de la tête et du thorax, est nommée céphalothorax ou encore prosome et porte une paire de chélicères, une paire de pédipalpes et quatre paires de pattes ;
- la région postérieure est l'abdomen ou opisthosome, elle présente en sa face ventrale les orifices des organes reproducteurs. (Eyssartier et al., 2021; Platnick et al., 2021)

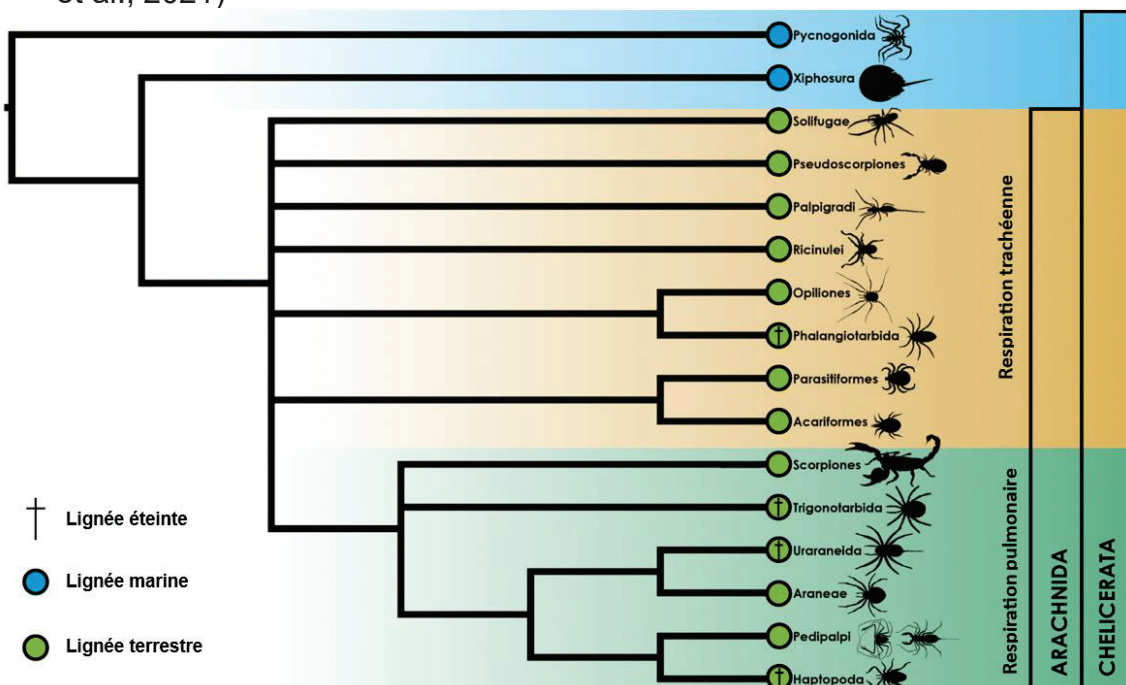


Figure 1 : Proposition d'arbre phylogénétique du sous-embranchement des Chélicérates
Parmi les 16 ordres d'Arachnides, quatre sont éteints.¹ (D'après Howard et al., 2019)

¹ Seuls 14 ordres d'Arachnides sont visibles sur la **Figure 1**, car elle fait référence à l'ancien ordre Pedipalpi, désormais divisé en trois ordres : Amblypygi, Uropygi et Schizomida.

Les chélicères et les pédipalpes, portés par le céphalothorax, sont des appendices buccaux. Les chélicères encadrent la bouche, tandis que les pédipalpes sont situés de part et d'autre des chélicères. Parmi les arachnides, la morphologie de ces appendices est très variable selon les espèces mais leur rôle est généralement semblable. Les chélicères permettent l'injection de venin à l'aide d'un crochet ou de pinces, tandis que les pédipalpes, équipés de chémorécepteurs, jouent un rôle de palpation voire de préhension des proies, notamment chez les scorpions. Bien qu'ils soient articulés et similaires à des membres, les pédipalpes sont rarement employés pour la locomotion des arachnides. Par leur fonction d'organe tactile, le rôle des pédipalpes des arachnides, et notamment des araignées, est généralement assimilable à celui des antennes des insectes. (Bellmann, 2014; Platnick et al., 2021)

b. L'ordre des Araignées (Araneae)

Les araignées se distinguent des autres ordres d'arachnides par deux caractéristiques principales :

- la production de soie par les glandes séricigènes abdominales, extrudées par les filières, appendices spécifiques aux araignées situés à l'extrémité de l'abdomen ;
- la modification du dernier segment des pédipalpes des mâles, qui forme le bulbe copulateur. Les pédipalpes jouent alors exclusivement chez les araignées un rôle majeur dans la fonction de reproduction. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Platnick et al., 2021; Rollard, 2021)

L'ordre des Araneae se divise en deux sous-ordres : les Mesothelae et les Opisthothelae. En 2025, une unique famille (les Liphistiidae) composée d'une centaine d'espèces, constitue le sous-ordre des Mesothelae. Les araignées mésothèles présentent des caractères primitifs, tels qu'une segmentation de l'abdomen. Ces araignées atypiques, rares et minoritaires ne seront pas étudiées dans le reste de ce travail. (Platnick et al., 2021)

La grande majorité des araignées actuelles (plus de 50 000 espèces) appartient au sous-ordre des Opisthothelae. Ce sous-ordre est également divisé en deux infra-ordres importants, classés selon la direction des mouvements des chélicères : les Mygalomorphae et les Araneomorphae. Les araignées mygalomorphes, communément appelées mygales, ont des chélicères effectuant des mouvements verticaux, tandis que ceux des aranéomorphes font des mouvements transversaux (**Figure 2**). Les mygales, représentées par plus de 2 600 espèces dont 18 en France, sont des araignées massives vivant essentiellement dans les zones tropicales. Cette répartition, plus distante des milieux anthropisés que celle des araignées aranéomorphes ubiquistes, peut être un argument expliquant pourquoi à ce jour, aucune étude évaluant l'impact des pesticides sur les mygalomorphes n'a été réalisée. (Eyssartier et al., 2021; Platnick et al., 2021)

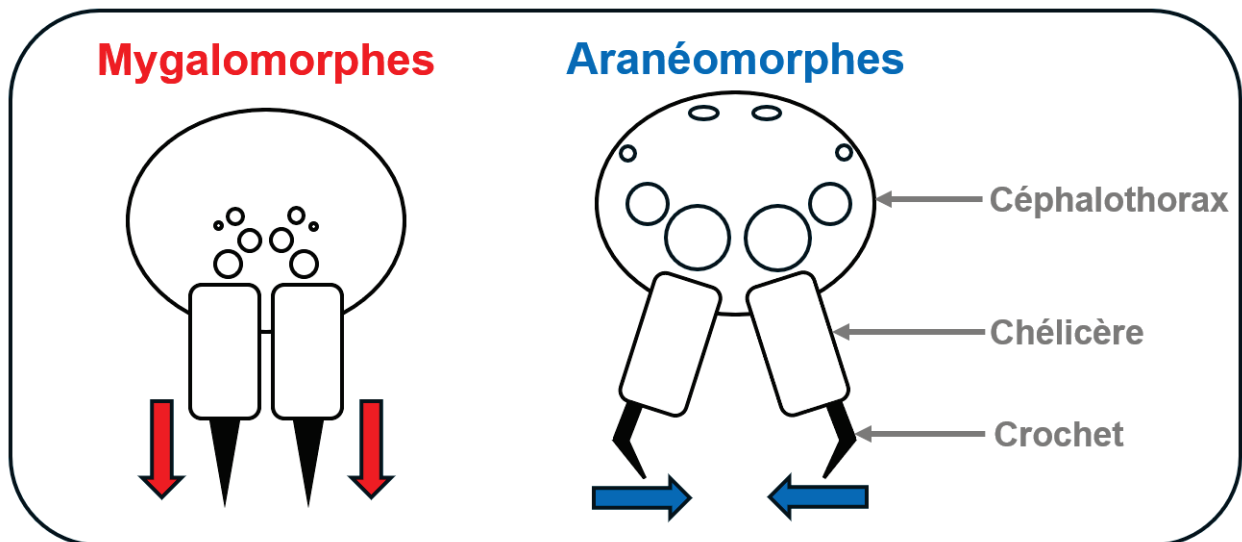


Figure 2 : Représentation schématique des mouvements des chélicères chez les mygalomorphes et chez les aranéomorphes

Les pédipalpes ne sont pas représentés. Les crochets des chélicères effectuent des mouvements verticaux chez les mygalomorphes, et des mouvements transversaux chez les aranéomorphes. (Source : DENIS Clément)

c. L'infra-ordre des Aranéomorphes (Araneomorphae)

L'infra-ordre des Aranéomorphes regroupe plus de 48 000 espèces (dont 1 700 présentes en France), soit 95 % des espèces actuellement décrites. Cette sous-partie propose un descriptif de l'anatomie externe (**Figure 3, Figure 4**) et interne (**Figure 5**) des araignées aranéomorphes, détaillant les éléments nécessaires à la compréhension des parties suivantes. Comme développé précédemment, le corps des araignées est divisé en deux parties, le céphalothorax et l'abdomen. Ces segments sont reliés par un fin pédicelle. (Eyssartier et al., 2021)

- Céphalothorax et appendices reliés au céphalothorax

Le céphalothorax porte une paire de chélicères, une paire de pédipalpes et quatre paires de pattes locomotrices. La rigidité du céphalothorax est plus importante que celle de l'abdomen car il comporte une carapace dorsale et une plaque sternale ventrale. (Platnick et al., 2021)

Les araignées aranéomorphes comptent entre six et huit yeux simples, nommés ocelles, situés sur la partie antérieure du céphalothorax. Leur taille, leur conformation et leur nombre varient selon les familles d'araignées, ce qui peut servir à leur identification. La vision n'est généralement pas très performante, notamment pour les familles chassant à l'aide d'une toile telles que les Araneidae. Certaines familles, notamment les Salticidae (communément nommées araignées sauteuses), se distinguent néanmoins par un sens de la vision très développé, leur permettant d'identifier des proies avec précision. (Bellmann, 2014)

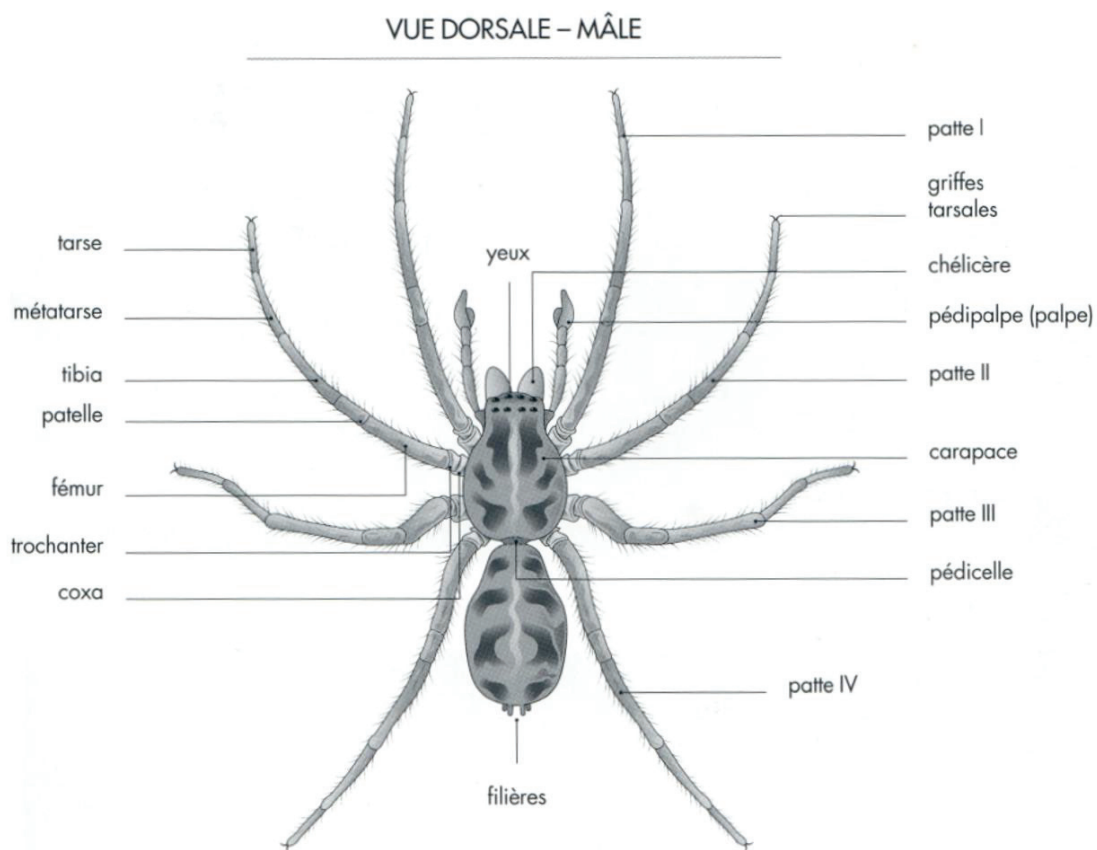


Figure 3 : Anatomie externe d'une araignée aranéomorphe mâle, vue dorsale
(Source : Platnick et al., 2021)

Les araignées aranéomorphes possèdent des glandes venimeuses dans leur céphalothorax, à la base des chélicères, permettant l'inoculation du venin à l'aide des crochets lors de la morsure des proies. Le venin des araignées consiste en un mélange complexe de centaines de peptides, d'enzymes et de protéines, propre à chaque espèce. Face au coût énergétique important nécessaire à la production d'un venin si riche en peptides et protéines, les araignées peuvent contrôler la quantité injectée lors de chaque morsure, par exemple en fonction de la taille de la proie. Il est également possible et fréquent que les morsures défensives, par exemple à l'encontre de grands mammifères tels que les humains, soient dépourvues d'injection de venin. L'effet du venin sur les proies est variable selon sa composition, mais il permet généralement une paralysie rapide (peptides neurotoxiques) et une prédigestion de la proie (enzymes digestives). Suite à la morsure et à la neutralisation de la proie, l'araignée libère des sucs enzymatiques par sa bouche permettant la finalisation de son exodigestion. Une fois la proie liquéfiée, l'araignée se nourrit en aspirant, à l'aide du jabot aspirateur, le liquide résultant de cette digestion extracorporelle. Les endites (lames maxillaires situées à la base des pédipalpes) entourant le labium (lèvre inférieure) limitent la chute de la nourriture liquéfiée lors de son aspiration. L'alimentation liquide poursuit alors son trajet dans les nombreux diverticules intestinaux du tube digestif, jusqu'au stockage des déchets dans la poche stercorale et leur expulsion par l'anus. (Eyssartier et al., 2021; Langenegger et al., 2019; Platnick et al., 2021; Rollard, 2021)

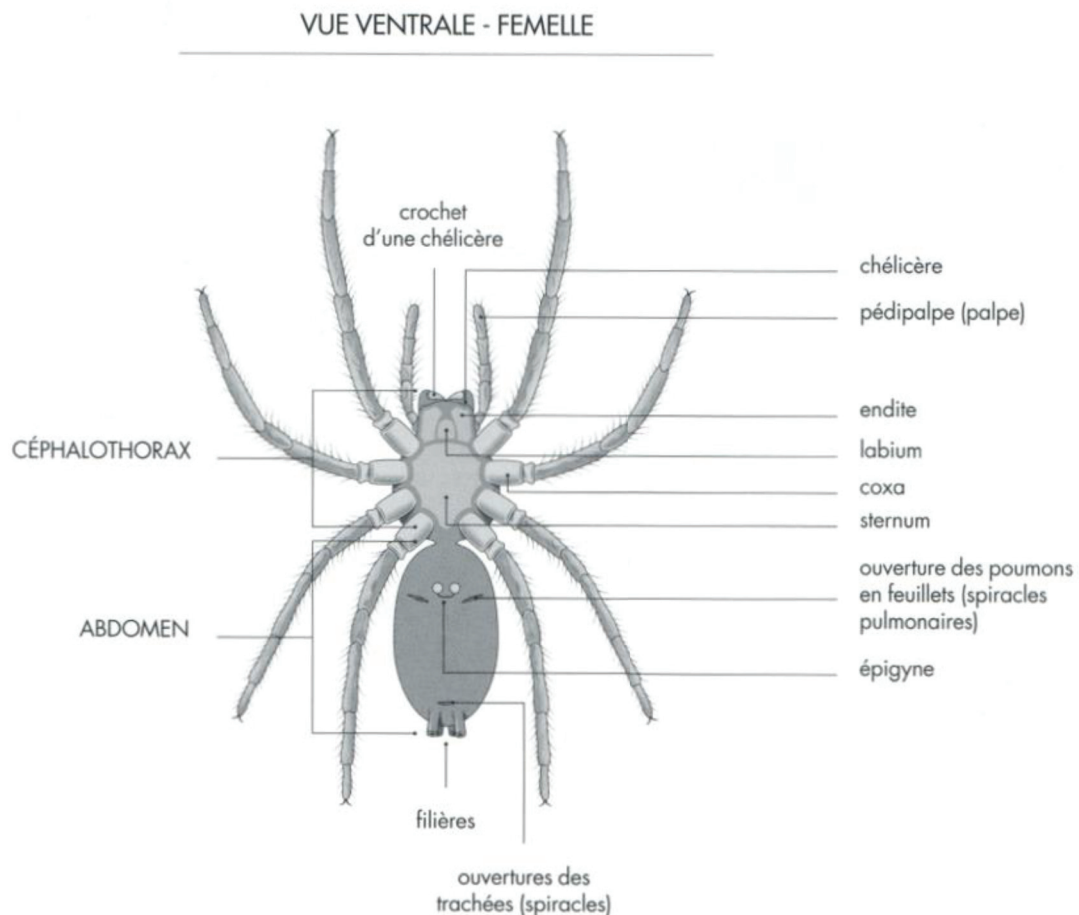


Figure 4 : Anatomie externe d'une araignée aranéomorphe femelle, vue ventrale
 Les pédipalpes de la femelle ne possèdent pas de bulbe copulateur à leur extrémité, contrairement au mâle, présenté en **Figure 3**. (Source : Platnick et al., 2021)

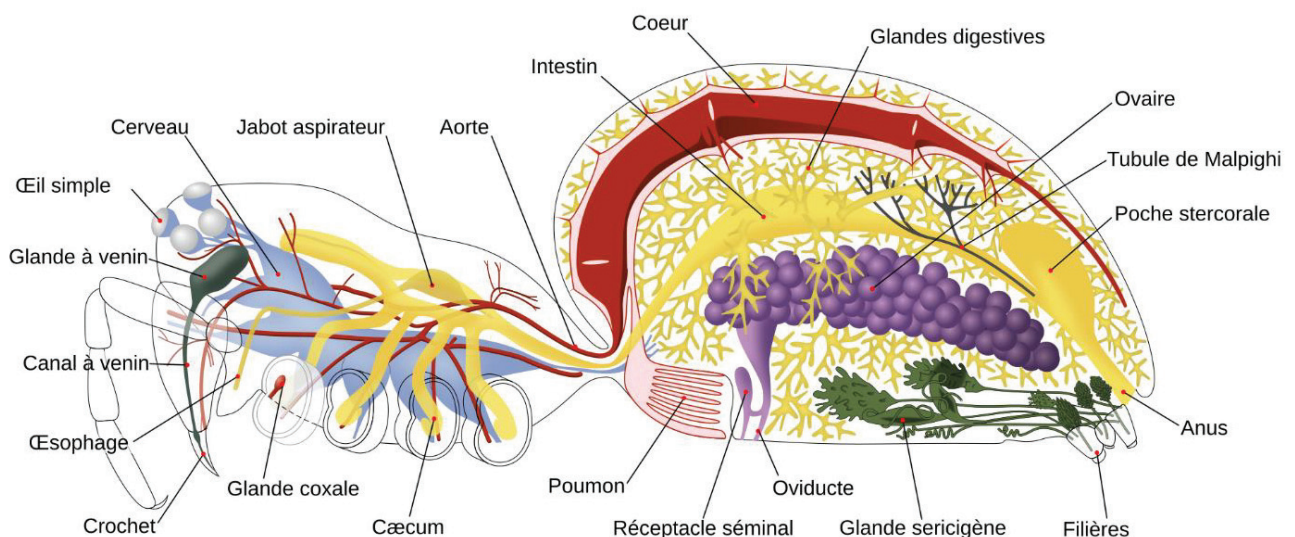


Figure 5 : Anatomie interne d'une araignée aranéomorphe femelle, coupe sagittale
 Le système trachéen n'est pas représenté. (D'après Comstock, 1912)

Les pédipalpes entourant les chélicères sont des appendices articulés en cinq segments (du plus proximal au plus distal : coxa, fémur, patella, tibia, tarse), situés en avant des pattes locomotrices. Les soies et chémorécepteurs présents à leur extrémité tarsale leur confèrent une grande sensibilité tactile. Chez les araignées mâles, les pédipalpes interviennent dans la fonction de reproduction : le segment tarsal, à l'extrémité du pédipalpe, supporte un bulbe copulateur. Il assure le transfert du sperme au cours de l'accouplement, par son intromission dans l'épigyne de la femelle (voir ci-après). La conformation du bulbe génital est très variable et unique selon les espèces et est complémentaire à celle de l'épigyne de la femelle, limitant ainsi l'hybridation entre deux espèces distinctes. (Bellmann, 2014; Platnick et al., 2021)

Les quatre paires de pattes locomotrices permettent aux araignées les plus rapides d'atteindre des maximums de vitesse avoisinant les 50 centimètres par seconde. Plus longues que les pédipalpes, elles sont divisées en sept segments : coxa, trochanter, fémur, patella, tibia, métatarse, tarse. La flexion des pattes est permise par des muscles fléchisseurs liés aux articulations des segments, tandis que leur extension est hydraulique : la contraction de muscles dans le céphalothorax propulse l'hémolymphe (liquide interne) vers les pattes, permettant leur extension. Certaines familles présentent des glandes coxales à rôle excréteur à la base de la première paire de pattes. Face à un danger, les araignées peuvent pratiquer l'autotomie en séparant leur patte au niveau de l'articulation coxale. La patte manquante pourra être régénérée au cours d'une mue chez une araignée qui n'a pas achevé sa croissance et n'est donc pas adulte. A l'extrémité des tarse se trouvent deux à trois griffes, parfois accompagnées de microscopiques touffes de soies adhésives permettant aux araignées d'évoluer sur des surfaces lisses et verticales (**Figure 6**). De plus, certaines espèces présentent de telles touffes de soies adhésives (alors nommées scopules) sur toute la face ventrale du métatarse et du tarse, améliorant également la capacité d'adhésion aux surfaces lisses. Ces soies sont davantage retrouvées chez les espèces chassant sans toile. Tout comme les pédipalpes, les pattes locomotrices, et notamment les deux paires antérieures, disposent de nombreux types de soies sensorielles :

- les chimiorécepteurs tarsaux permettent l'olfaction en reconnaissant les odeurs des proies et congénères ;
- des soies reliés à des mécanorécepteurs jouent un rôle tactile ;
- les trichobothries, longues soies dressées sur les pattes, captent les vibrations de l'air et confèrent aux araignées un certain sens de l'audition.

Les informations recueillies par ces différents organes sensoriels sont transmises aux ganglions cérébraux, contenus dans le céphalothorax. (Platnick et al., 2021; Rollard, 2021)

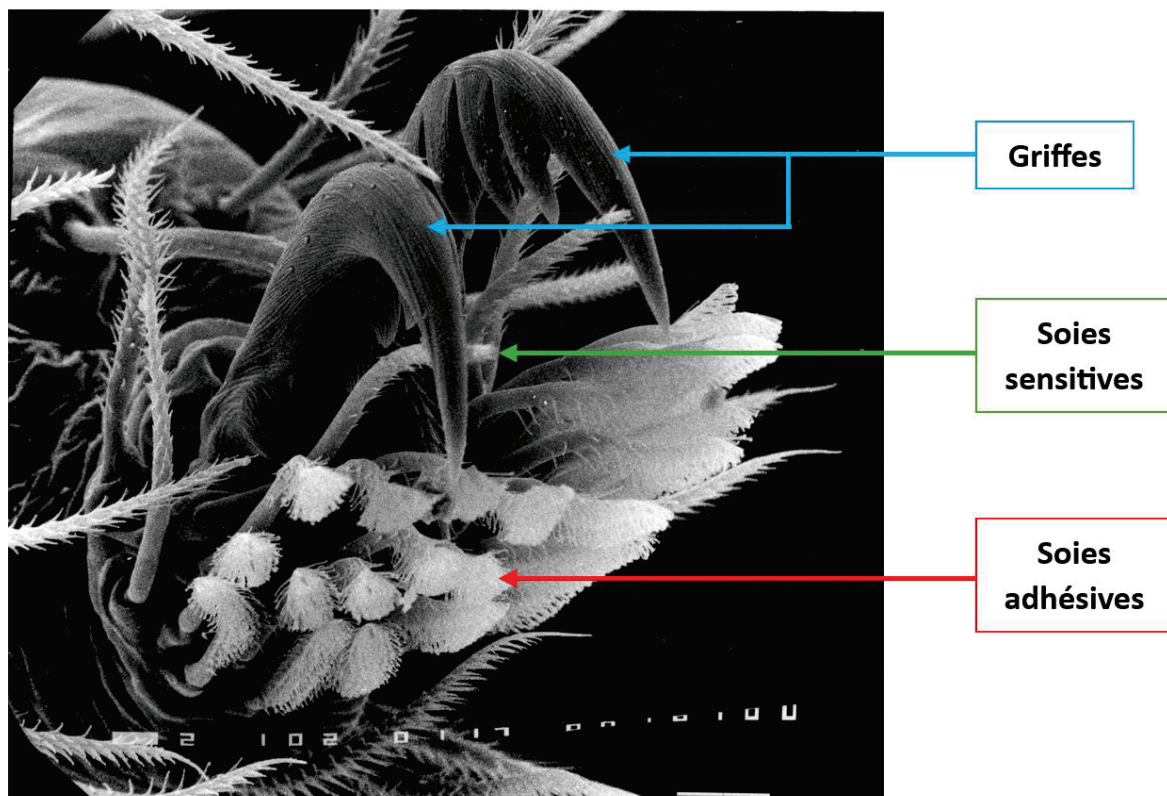


Figure 6 : Extrémité d'une patte locomotrice d'une araignée présentant des soies adhésives, en microscopie électronique à balayage

Toutes les araignées aranéomorphes présentent deux à trois griffes tarsales, ainsi que des soies leur procurant une sensibilité tactile précise. Chez cette espèce, on retrouve également des touffes de soies microscopiques adhésives qui lui confèrent la capacité de se déplacer sur des surfaces lisses et verticales telles que du verre. (D'après Futura Sciences, 2017)

- Abdomen, filières et appareil reproducteur

L'abdomen est généralement recouvert d'une mince cuticule chitineuse, le rendant plus souple que le céphalothorax et facilitant le tissage des toiles. (Platnick et al., 2021)

A l'extrémité postérieure de l'abdomen se trouvent des filières, généralement au nombre de six. Celles-ci disposent d'appendices terminaux en forme de tube creux très mobiles, les fusules, desquels est expulsée la soie. Une araignée peut présenter jusqu'à sept types différents de glandes séricigènes internes, permettant chacun la production d'un type de soie particulier ayant une fonction précise. Par exemple, la soie collante produite par certaines glandes est utilisée pour piéger les proies sur les toiles, tandis que d'autres types de soies servent à la formation des cocons ou encore à créer les fils permettant le déplacement des araignées entre deux surfaces. (Bellmann, 2014; Platnick et al., 2021; Rollard, 2021)

L'abdomen abrite également les appareils reproducteurs. Chez le mâle, les testicules produisent le sperme, émis par la fente épigastrique sur la face ventrale de l'abdomen. Le sperme est déposé sur une toile produite spécifiquement à cet effet, la toile spermatique. Ensuite, il est aspiré par les bulbes copulateurs situés sur les pédipalpes et stocké pour l'accouplement avec une femelle. Chez la femelle, les ovaires produisent des œufs émis au niveau de la fente épigastrique. A cet endroit, les araignées dites entélégyne présentent une pièce tégumentaire externe complexe, l'épigyne, qui correspond parfaitement à l'extrémité des bulbes copulateurs du mâle. La complexité structurelle de l'épigyne est telle qu'elle permet généralement l'identification de l'espèce. Suite à l'accouplement, la femelle stocke le sperme dans des spermathèques jusqu'à ce que le sac à œufs soit confectionné. Lors de l'émission des œufs dans le sac, le sperme contenu dans les spermathèques permettra leur fécondation. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Platnick et al., 2021)

- Système circulatoire et respiratoire

Comme tous les arthropodes, le système circulatoire des araignées est ouvert : les organes baignent dans l'hémolymphe, que le cœur, tubulaire et dorsal dans l'abdomen, pompe et distribue autour des organes selon les besoins physiologiques de l'animal. L'hémolymphe des araignées comporte de l'hémocyanine, protéine analogue à l'hémoglobine des vertébrés de par son rôle de transporteur d'oxygène. Les araignées sont les uniques animaux présentant deux systèmes respiratoires fonctionnels différents : leur respiration est simultanément pulmonaire et trachéenne. Les ouvertures des poumons sont situées dans la partie antérieure de l'abdomen ventral. Les poumons sont composés de nombreux feuillets permettant une oxygénation maximale de l'hémocyanine dans l'hémolymphe qui sera redirigée par le cœur vers les organes. L'ouverture (ou spiracle) du système trachéen est quant à elle localisée dans la partie postérieure de l'abdomen ventral. Les trachées apportent directement l'oxygène aux cellules tissulaires. Enfin, les tubules de Malpighi assurent la détoxification de l'hémolymphe. (Lopardo et al., 2022; Rollard, 2021)

2. Principales méthodes de capture des proies

a. Capture passive à l'aide d'un piège : la toile

i. Soies et formation des fils

Les six filières, regroupées par paires (antérieure, médiane et postérieure), sont très mobiles et permettent l'émission de la soie issue des glandes séricigènes. La soie liquide est expulsée suite à une augmentation de la pression interne de l'hémolymphe. Elle gagne en solidité au cours du son trajet jusqu'à devenir un fil solide à la sortie des fusules des filières. Ce fil, dont le diamètre fait en moyenne 50 micromètres, est

composé de multitudes de fibrilles s'entrelaçant. Cette conformation confère au fil d'exceptionnelles propriétés : souplesse, légèreté, mais aussi une résistance incroyable, évaluée au triple de celle du Kevlar (matériau composant notamment les gilets pare-balles). (Eyssartier et al., 2021; Rollard, 2021)

La soie est composée de grandes protéines nommées spidroïnes (contraction de l'anglais « *spider fibroins* » : « *spidroïns* »). Il existe de nombreuses spidroïnes, chacune conférant à la soie formée des propriétés particulières. Les sept types de glandes séricigènes (piriforme, ampullacée majeure, ampullacée mineure, tubuliforme, flagelliforme, aciniforme et agrégée), parfois tous présents chez une même araignée, peuvent synthétiser tous types de spidroïnes. Généralement, au sein d'un type de glande, un type de spidroïne prédomine, permettant alors aux glandes de répondre à des besoins spécifiques. Par exemple, la soie produite par la glande ampullacée majeure est utilisée pour construire le cadre de la toile, tandis que celle produite par la glande agrégée est collante et permet l'adhésion des proies sur la toile (**Figure 7**). (Eisoldt et al., 2011; Yu et al., 2022)

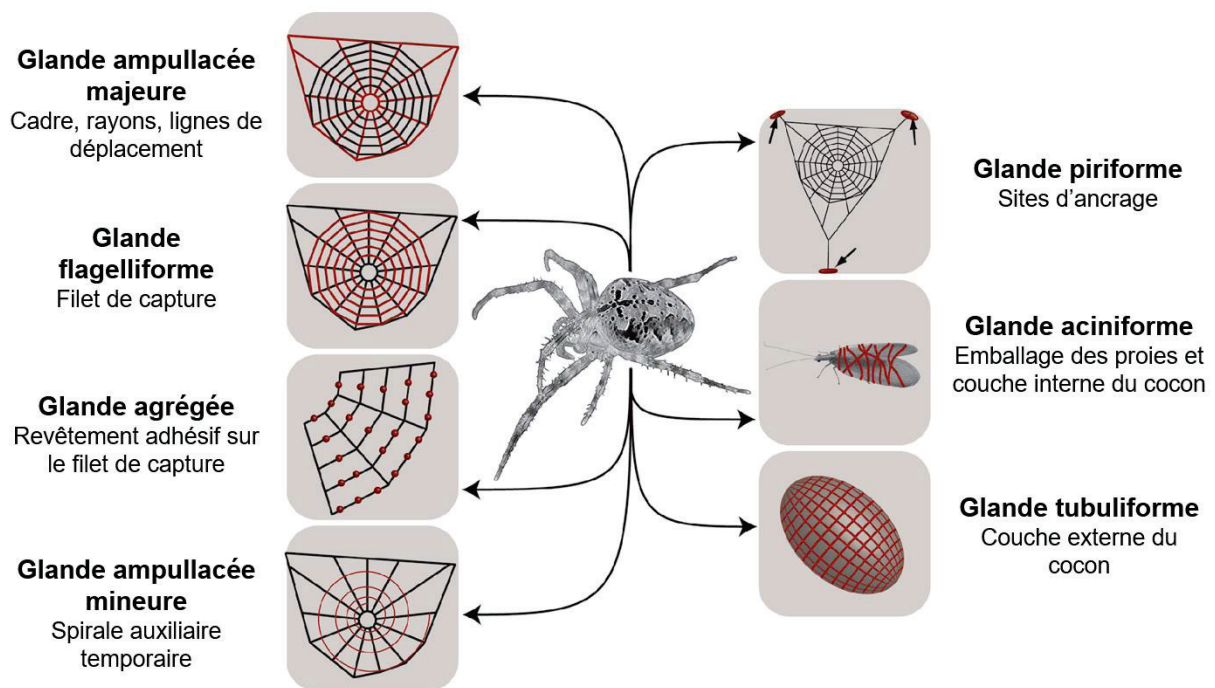


Figure 7 : Fonctions des fils de soie produits par les sept types de glandes séricigènes de l'épeire diadème (*Araneus diadematus*)

Comme toutes les araignées de la famille des Araneidae, l'épeire diadème possède tous les types de glandes séricigènes. La construction de la toile géométrique nécessite l'intervention de cinq types de glandes. Le cocon est composé de fils de natures différentes, la couche interne est molle tandis que la couche externe est très rigide. (D'après Eisoldt et al., 2011)

ii. Différents types de toiles

Selon les familles et espèces d'araignées, les toiles peuvent être de formes et conformations très variées. Les toiles géométriques, dites orbiculaires, réalisées notamment par les araignées orbitèles telles que les Araneidae (épeires) et les Tetragnathidae, sont les plus complexes. La construction a généralement lieu tôt dans la matinée, et est répétée quotidiennement chez certaines espèces. Tout d'abord, un long fil de soie est tendu entre deux sites d'ancrage. L'araignée orbitèle s'installe alors en son milieu, et se laisse pendre le long d'un nouveau fil, donnant alors à la toile une forme en « Y ». A l'intersection de ces trois fils, l'araignée crée quelques rayons de consolidation puis tisse le cadre externe de la toile. Elle forme alors les rayons principaux reliant le centre de la toile (nommé moyeu) au cadre, puis réalise une spirale partant du centre vers l'extérieur. Cette spirale auxiliaire temporaire sert de support et de guide permettant à l'araignée de tisser le filet de capture : en partant cette fois de l'extérieur, elle dispose le fil adhésif en une spirale concentrique serrée, tout en recyclant la spirale auxiliaire en la mangeant. Les araignées orbitèles font intervenir jusqu'à cinq types de glandes séricigènes différents pour tisser les divers fils constituant les toiles (**Figure 7**). Alors que certaines araignées (par exemple, l'épeire diadème – *Araneus diadematus*) se placent au centre de leur toile et que d'autres (épeire à quatre points – *Araneus quadratus*) se camouflent dans des loges reliées par un fil d'alarme à la toile, l'épeire des fenêtres (*Zygiella x-notata*) accroche directement ce fil à une patte locomotrice antérieure. (Bellmann, 2014)

Les toiles peuvent également avoir des formes plus irrégulières. Les toiles des Theridiidae, très primitives, consistent en un enchevêtrement lâche de fils en forme de dôme. Certaines familles, telles que les Linyphiidae ou les Agelenidae, réalisent des toiles en nappe très denses. Chez cette dernière famille, la toile se prolonge par une cachette en entonnoir abritant l'araignée attendant l'arrivée de proies. Enfin, la toile peut consister en un tube caché dans une cavité naturelle (entre des rochers par exemple) – comme chez les Segestriidae - ou dans un trou creusé, notamment chez des familles de mygalomorphes telles que les Atypidae. Des fils radient tout autour de la cachette, permettant de repérer les proies passant à proximité. (Rollard, 2021)

Toutes les toiles ont néanmoins la même fonction principale. Lorsqu'une proie entre en contact avec la toile, les vibrations produites par l'impact et les tentatives de fuite sont propagées jusqu'à l'araignée. Celle-ci peut alors localiser précisément la proie et se diriger vers elle afin de la mordre et la consommer immédiatement ou l'emballer pour une consommation future. Cette localisation est d'autant plus précise chez les araignées orbitèles, même lorsque la structure de la toile est dégradée. Mulder et al. (2020) ont montré que l'épeire diadème (*Araneus diadematus*) est capable de localiser et capturer une proie efficacement même lorsque sa toile est grandement déformée, par exemple par l'action du vent.

Au fil du temps, les toiles irrégulières se dégradent et des éléments non comestibles peuvent s'y accumuler. Les araignées peuvent alors nettoyer et réparer la toile, mais elles ne vont que rarement la détruire pour la reconstruire entièrement. A

l'inverse, les araignées orbitèles renouvellent très régulièrement leur toile géométrique, parfois quotidiennement. Lors de la destruction de l'ancienne toile, les araignées consomment la soie riche en protéines, afin de la recycler. (Rollard, 2021)

b. Capture sans piège : active à l'approche ou passive à l'affût

Bien que toutes les araignées produisent de la soie, seulement la moitié des araignées décrites tissent une toile pour capturer des proies. Les familles d'araignées n'ayant pas recours à une toile chassent les proies de manière plus active. (Rollard, 2021)

Les araignées-loups (famille des Lycosidae) sont les chasseuses actives par excellence. Elles se déplacent sur le sol tout au long de la journée à la recherche de proies et il n'est pas rare de les observer courir lors de promenades en forêt. Dès qu'une proie est repérée, l'araignée fonce sur elle afin de la mordre et la consommer. Similairement, de très nombreuses familles (Pisauridae, Zoropsidae...) recherchent des proies en errant sur tous types de supports et en marchant dans leur environnement. Les araignées sauteuses (Salticidae) présentent la particularité de bondir sur les proies une fois arrivées à leur proximité. Quant aux Philodromidae, elles alternent entre des périodes de recherche active et de l'affût passif. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Rollard, 2021)

D'autres familles d'araignées chassent de façon plus passive sans pour autant tisser de toiles. Ainsi, les Sparassidae et les Thomisidae restent des heures à l'affût dans la végétation, à attendre l'arrivée d'une proie. Cet affût est généralement aidé par un camouflage efficace, poussé à l'extrême chez la thomise variable (*Misumena vatia*) et la thomise enflée (*Thomisus onustus*) qui sont capables de changer de couleur en quelques jours pour mieux se fondre dans la fleur sur laquelle elles se cachent. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Platnick et al., 2021; Rollard, 2021)

Les nombreuses méthodes de chasse des araignées les exposent à des proies variées : une espèce à l'affût dans une fleur capturera notamment des pollinisateurs tandis qu'une espèce au sol se nourrira de divers arthropodes terrestres. La diversité des espèces d'araignées implique une multitude de méthodes de chasse, dont l'originalité n'est parfois retrouvée que chez d'uniques familles, genres ou espèces. Ainsi, *Scytodes thoracica* (principal représentant des Scytodidae en France) possède des glandes à venins modifiées, produisant du venin et de la soie, lui conférant la capacité de projeter à courte distance un filament gluant par ses chélicères, incapacitant la proie et facilitant la morsure mortelle. Un autre exemple de chasse originale est l'utilisation par les araignées du genre *Deinopis* (Deinopidae) d'un filet de soie élastique tenu par leurs deux paires de pattes antérieures, pour chasser activement les insectes volants passant à proximité en les capturant à la manière d'un gladiateur – leur valant par ailleurs le surnom d'araignées rétiaires. (Bellmann, 2014; Platnick et al., 2021; Rollard, 2021)

3. Reproduction et croissance des araignées

a. Préparation, rapprochement et accouplement

Chez les araignées, la période de reproduction se déroule essentiellement en début d'été ou en automne, selon les espèces. L'anatomie des araignées mâles présente une disposition très singulière, de par la séparation entre l'appareil génital (les testicules) et l'appareil copulateur (les bulbes copulateurs). Avant de partir à la recherche d'une femelle, l'araignée mâle doit donc remplir ses bulbes copulateurs de sperme. Il tisse une toile en forme de tente, nommée toile spermatique, et y dépose une goutte de sperme qu'il aspire ensuite par capillarité avec les deux bulbes situés à l'extrémité de ses pédipalpes. Le mâle peut alors se mettre à la recherche d'une partenaire, guidé par les phéromones sexuelles qu'elle disperse dans l'air à proximité de sa toile ou de son abri. Chez les araignées aranéomorphes, un dimorphisme sexuel est fréquemment observé : les femelles sont généralement plus grandes et massives que les mâles. Ce dimorphisme de taille est par exemple très marqué chez la néphile dorée (*Trichonephila inaurata*, Araneidae), le mâle pouvant être onze fois plus petit que la femelle. (Bellmann, 2014; Rollard, 2021)

Face à ce dimorphisme fréquent chez les aranéomorphes, il est important que le mâle se fasse reconnaître non comme une proie, mais comme un partenaire potentiel. Selon les familles et les espèces, on retrouve des comportements d'approche très variés, dont les plus communs sont présentés ci-après. Chez les araignées tissant des toiles, le mâle initie le rapprochement en faisant vibrer et en percutant les fils afin d'attirer la femelle. La fréquence des vibrations permet à la femelle réceptive de l'identifier comme un partenaire. Chez les araignées vivant au sol, l'acceptation du mâle par la femelle se fait généralement par le biais d'une parade. Par exemple, alors que des mâles Lycosidae attirent les femelles en émettant des sons en tambourinant le sol, les mâles Salticidae font surtout appel au sens de la vision développé de la femelle en agitant leurs pédipalpes et pattes antérieures généralement colorés. La coloration de l'abdomen de l'araignée paon mâle (genre *Maratus*, notamment *Maratus volans*, Salticidae) joue également un rôle dans sa remarquable parade nuptiale : il soulève son abdomen coloré vers la femelle, à la manière d'un paon faisant la roue, et procède à une véritable danse pour séduire la femelle. Enfin, la parade peut également passer par une offrande, comme chez le mâle *Pisaura mirabilis* (Pisauridae) qui offre une proie emballée à la femelle afin d'éviter la prédation. (Bellmann, 2014; Rollard, 2021; Toft & Albo, 2016)

Dès que le mâle est accepté par la femelle, l'accouplement peut avoir lieu. L'approche de la femelle par le mâle peut se faire de nombreuses façons selon les espèces : par exemple, certains mâles soulèvent la femelle avec leurs pattes antérieures, tandis que d'autres l'abordent par le côté. Le mâle utilise alors ses pédipalpes pour insérer l'extrémité de ses bulbes copulateurs au niveau de l'ouverture génitale de la femelle, située sous son abdomen. Le sperme émis par les bulbes est stocké par la femelle dans des spermathèques. Chez les aranéomorphes, on distingue les femelles haplogynes ayant une organisation génitale primitive et les femelles

entélegynes. Les haplogynes disposent d'une seule ouverture génitale et ne présentent pas d'épigyne. Lors de la ponte, les œufs fécondés par le sperme stocké dans les spermathèques sont alors émis par le même canal que celui emprunté par le sperme lors de l'accouplement. A l'inverse, les entélegynes présentent une organisation génitale plus évoluée. L'ouverture génitale primaire est en partie recouverte par une plaque tégumentaire complexe, l'épigyne. Des ouvertures présentes sur l'épigyne sont reliées aux spermathèques par des canaux. Ainsi, lors de l'accouplement des entélegynes, le mâle insère ses bulbes au niveau des orifices de l'épigyne et émet le sperme qui arrive directement dans les spermathèques. La stricte complémentarité entre les structures génitales complexes des entélegynes ne permet l'accouplement qu'entre araignées appartenant à la même espèce. Lors de la ponte, le sperme contenu dans les spermathèques fertilise les œufs, qui sont alors émis par l'ouverture génitale primaire (**Figure 8**). Contrairement aux idées reçues, l'accouplement n'est pas systématiquement suivi de la mort du mâle par prédation. Alors que certains mâles doivent effectivement fuir dès la fin de l'accouplement pour éviter toute attaque de la femelle, on observe chez quelques espèces une cohabitation des deux sexes sur le même habitat (toile, terrier...) pendant une courte durée. Néanmoins, même en échappant à la prédation, les mâles meurent généralement de cause naturelle peu de temps après l'accouplement. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Platnick et al., 2021; Rollard, 2021)

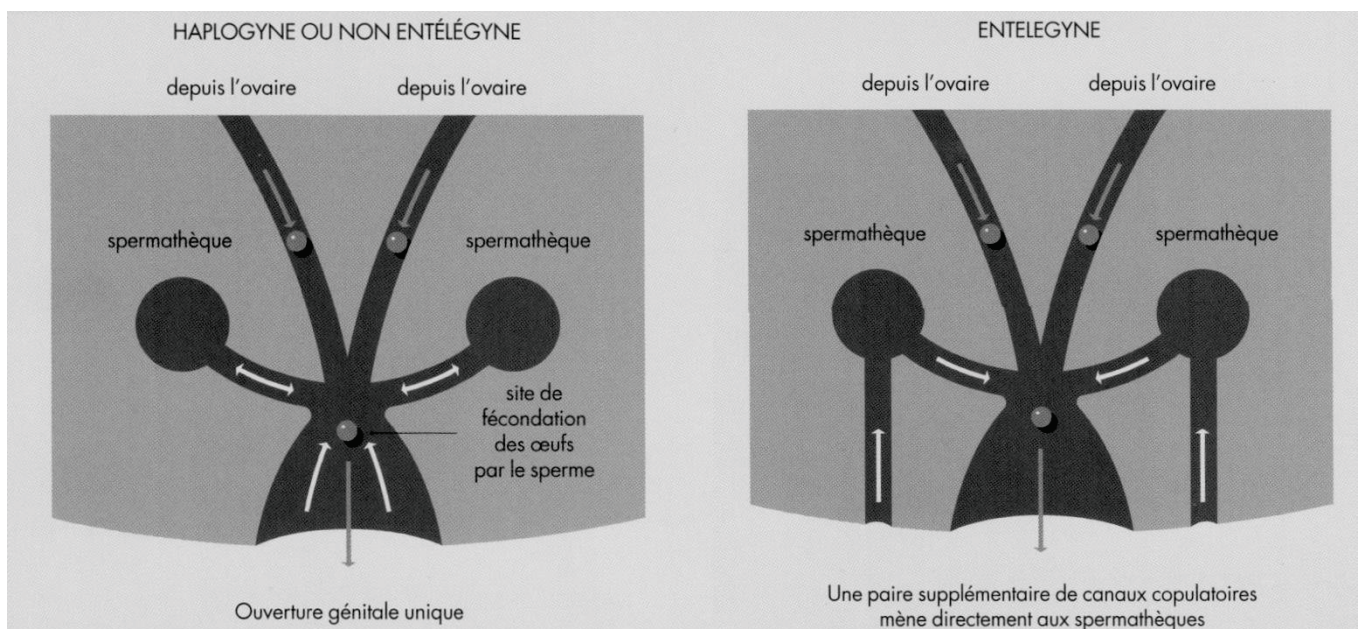


Figure 8 : Organisation de l'appareil reproducteur chez les femelles haplogynes et entélegynes
Les haplogynes présentent une ouverture génitale unique, tandis que les entélegynes ont une paire supplémentaire de canaux copulateurs reliant les orifices de l'épigyne aux spermathèques. (Source : Platnick et al., 2021)

b. Formation du cocon, éclosion et développement

Au cours des semaines suivant l'accouplement, la formation des œufs fait gonfler l'abdomen des araignées femelles, tandis que le sperme est conservé dans les spermathèques en attendant des conditions de ponte optimales. La ponte est saisonnière, elle a généralement lieu au printemps ou en fin d'été selon les espèces. Lors de l'émission des œufs, le sperme contenu dans les spermathèques les féconde. Une fois les œufs émis par l'ouverture génitale, ils sont recouverts de fils de soie de sorte à former un cocon plus ou moins épais. Ainsi, chez les Pholcidae, seuls quelques fils entourent les œufs, tandis que l'argiope frelon (*Argiope bruennichi*, Araneidae) confectionne un cocon massif structuré avec plusieurs couches de fils de compositions différentes. Selon les espèces et familles, le devenir du ou des cocons formés est variable. Les espèces ne survivant pas à la ponte vont cacher le cocon dans la végétation afin de le dissimuler et le protéger. A l'inverse, certaines femelles sont capables de surveiller le cocon jusqu'à l'éclosion, voire jusqu'à l'autonomie des petits. Les méthodes de garde du cocon sont nombreuses : il peut être intégré à la toile (Theridiidae), accroché sur un substrat végétal sur lequel la femelle se poste (Thomisidae), inclus dans une loge où veille la femelle (Salticidae) ou encore directement porté par la femelle par les chélicères ou les filières (Lycosidae, **Figure 9, A**). (Bellmann, 2014; Rollard, 2021)

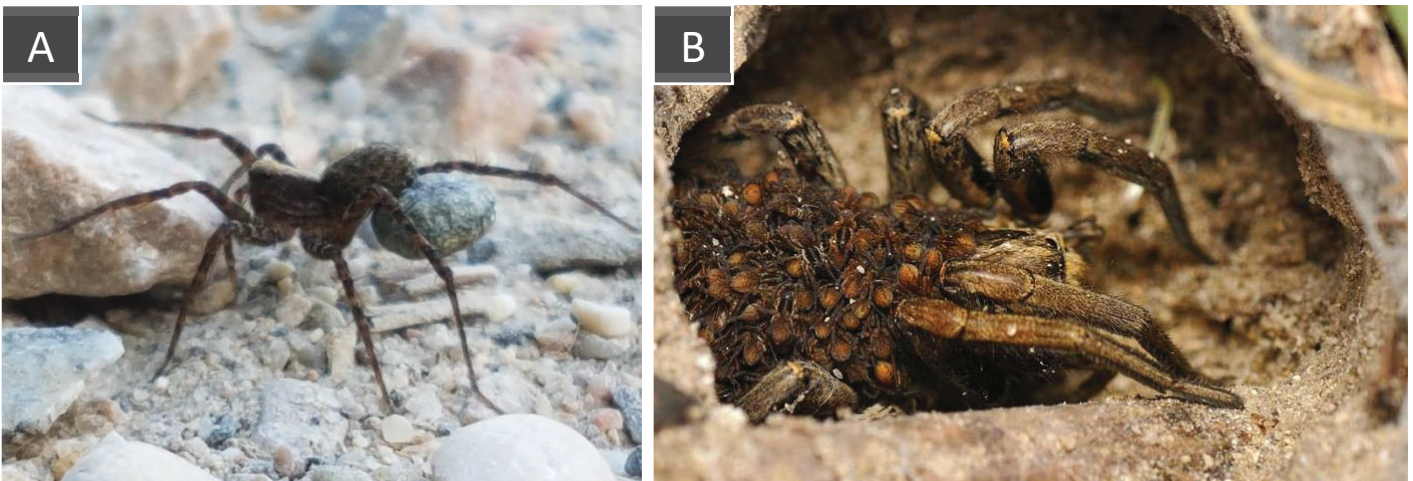


Figure 9 : Comportements maternels chez les Lycosidae

(A) : Araignée-loup femelle du genre *Pardosa* portant son cocon avec ses filières. Les femelles transportent le cocon de sa confection jusqu'à l'éclosion.

(B) : *Hogna radiata* femelle à l'entrée de son terrier. Suite à l'éclosion, les Lycosidae transportent leurs petits sur leur dos jusqu'à leur première mue, à la suite de laquelle ils se dispersent dans l'environnement.

(Sources : (A) DENIS Clément ; (B) LEROY B. (Inventaire national du patrimoine naturel (INPN), 2014a))

Au bout de quelques semaines à quelques mois, les œufs éclosent. Après quelques semaines protégés par le cocon, les petits effectuent leur première mue et deviennent plus actifs et résistants. Suite à la perforation du cocon, ils restent ensemble pendant une période plus ou moins longue selon les espèces. Chez la plupart des épeires (Araneidae), la femelle ne survit pas à la ponte et les petits sont donc laissés à eux-mêmes : après une courte période grégaire (**Figure 10, A**), ils se

dispersent pour débiter leur vie solitaire. Certaines familles témoignent néanmoins de réels comportements maternels. Suite à l'éclosion du cocon qu'elles transportaient sur leurs filières, les araignées-loups (Lycosidae) protègent leurs petits en les transportant sur leur dos (**Figure 9, B**). Des espèces de la famille des Theridiidae présentent de nombreux comportements maternels tels que le stockage de proies en attendant l'éclosion, l'ouverture du cocon pour faciliter la sortie des petits ou encore la régurgitation de proies digérées pour alimenter les petits. Enfin, dans certains cas, les petits dévorent la mère suite à sa mort naturelle. (Barrantes & Weng, 2009; Bellmann, 2014; Rollard, 2021)

Les jeunes araignées, devenues autonomes, se dispersent. Pour cela, elles se placent en hauteur, se dressent sur leurs pattes antérieures et émettent de longs fils de soie. Sous l'action du vent sur les fils, les araignées sont soulevées et déplacées sur de longues distances, parfois à des centaines de kilomètres de leur point de départ ! Ce phénomène de dispersion, nommé « *ballooning* » (de l'anglais « faire de la montgolfière »), peut également se produire en absence de vent. En effet, Morley et Robert ont montré en 2018 que les araignées peuvent détecter le champ électrique terrestre à l'aide de leurs soies sensibles, et l'utiliser pour assurer leur portance. Le faible poids des jeunes araignées permet une dispersion aérienne optimale et a permis aux araignées de coloniser de nombreux milieux. Ce phénomène est néanmoins rarement observé chez les araignées adultes, plus massives. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Morley & Robert, 2018; Rollard, 2021)



Figure 10 : Croissance des araignées : éclosion et mues

(A) : Suite à l'éclosion, les jeunes épeires de la famille des Araneidae restent groupées quelques jours sur la toile de leur mère, avant de se disperser par *ballooning*.

(B) : Araignée de la famille des Thomisidae venant de muer. L'exuvie, ancienne enveloppe chitineuse de l'animal, est visible sur le haut de la photo.

(Source : DENIS Clément)

La croissance s'effectue par le biais de mues (généralement entre trois et 12) jusqu'à atteindre la taille adulte. Pour muer, l'araignée se fixe avec ses chélicères sur un support ou se suspend à sa toile et la pression de l'hémolymphe fait éclater la carapace dorsale de son céphalothorax. Elle s'extirpe de son exuvie (nom porté par l'ancienne enveloppe entourant l'araignée) et est alors très vulnérable pour une courte durée car son corps n'est pas rigide (**Figure 10, B**). Les mues permettent à l'araignée de grandir, de développer son appareil reproducteur (notamment la conformation des bulbes copulateurs chez les mâles) ainsi que de progressivement reformer d'éventuels membres séparés par autotomie. La majorité des araignées aranéomorphes a un cycle de vie d'un à deux ans, tandis que certaines mygalomorphes peuvent vivre jusqu'à une vingtaine d'années. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Rollard, 2021)

4. Rôle écologique des araignées

a. Des habitats variés

Grâce à leur grande diversité spécifique (plus de 50 000 espèces), les araignées sont présentes sur tous les continents à l'exception de l'Antarctique. Alors que certains genres et espèces ont une répartition géographique très large, parfois mondiale, d'autres sont endémiques. En 2023, la Liste rouge des espèces menacées en France a dénombré 127 espèces endémiques parmi les 1 622 espèces natives recensées dans l'Hexagone. (INPN, 2023)

Les araignées ont colonisé de très nombreux types d'écosystèmes, les exposant de façon plus ou moins importante aux pesticides. Les forêts abritent la plus grande diversité d'espèces, réparties du sol jusqu'à la cime des arbres : des espèces vivent sur la litière, d'autres se cachent entre des rochers et des écorces, tandis que celles tissant des toiles peuvent être localisées sur des végétaux à des hauteurs très variées. Les plaines et les champs abritent également de nombreuses araignées, qui sont dès lors très exposées aux pesticides utilisés dans l'agriculture. Les zones ripariennes sont des zones de végétation en bordure de cours d'eau qui abritent une faune et une flore très riches, propices au développement des araignées. Ces zones consistent généralement en une transition entre des terres agricoles et les cours d'eau qu'elles bordent, jouant alors un important rôle de filtre biologique en limitant l'entrée de substances polluantes dans les cours d'eau. Dès lors, les araignées des zones ripariennes (telles que les Tetragnathidae) sont particulièrement exposées aux pesticides et autres substances polluantes. (Bellmann, 2014; Graf et al., 2019; Rollard, 2021)

Certaines araignées sont adaptées à la vie dans des habitats très précis. L'exceptionnelle argyronète (*Argyroneta aquatica*, Dictynidae) est la seule espèce d'araignée vivant quasiment exclusivement sous l'eau. N'étant pas munie de branchies, elle respire à l'aide d'une bulle d'air maintenue autour de son abdomen

parsemé de poils hydrophobes. Sous l'eau, elle construit une toile entre des végétaux aquatiques et fabrique une véritable cloche d'air maintenue par la soie, ne remontant à la surface que pour la réalimenter en air avec la bulle entourant son abdomen (**Figure 11**). A l'inverse, certaines araignées ont colonisé des milieux secs tels que les dunes ou encore les déserts. Enfin, alors que des araignées troglaphiles telles que *Meta menardi* (Tetragnathidae) sont retrouvées dans des grottes et cavernes, certaines araignées ne vivent qu'en haute altitude : par exemple, *Sitticus longipes* est une Salticidae endémique des Alpes vivant entre 2 500 et 3 000 mètres d'altitude. (Bellmann, 2014; Rollard, 2021; Seymour & Hetz, 2011)

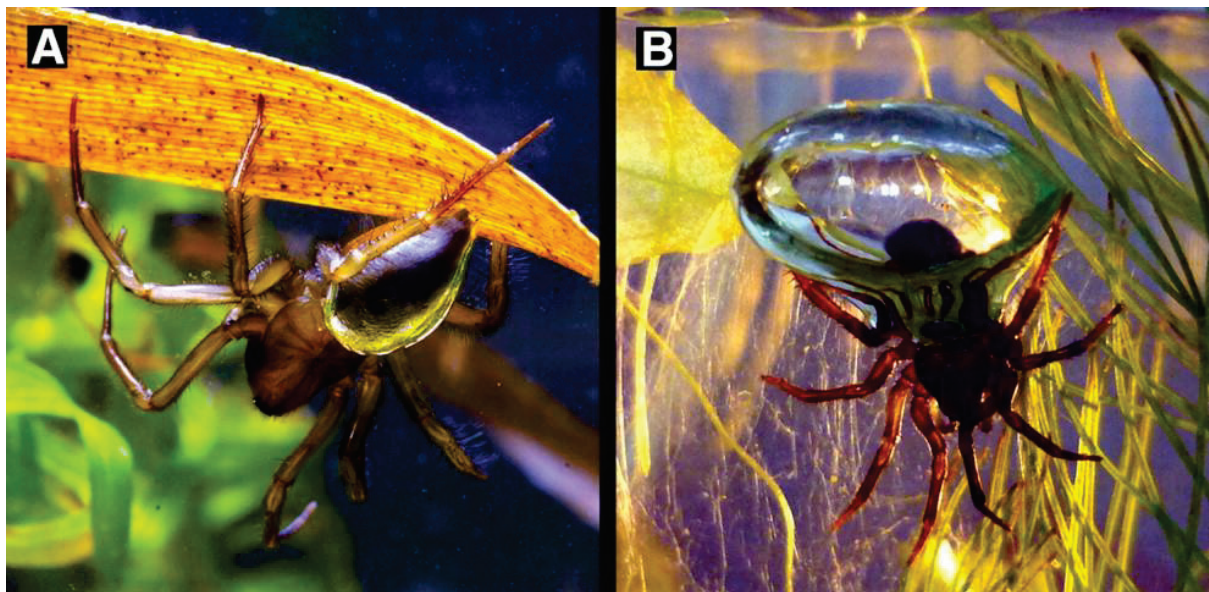


Figure 11 : Respiration aquatique de l'argyronète (*Argyroneta aquatica*)

(A) : Bulle d'air maintenue autour de l'abdomen de l'araignée par l'hydrophobie de ses poils.
 (B) : Cloche d'air de petite taille, supportée par une toile. Des cloches plus larges peuvent accueillir l'intégralité du corps de l'araignée, voire lui permettre de se déplacer à l'intérieur.
 (Source : Seymour & Hetz, 2011)

Contrairement à ces araignées vivant en extérieur, des espèces ne sont pratiquement retrouvées que dans les habitations humaines. Parmi nos plus courantes colocataires, *Pholcus phalangioides* (Pholcidae) se démarque par ses longues pattes très fines et est généralement observable toute l'année, tandis que les imposantes tégénaires (famille des Agelenidae) vadrouillant les soirs d'automne en quête d'une femelle nous surprennent par leur rapidité – quand on ne les retrouve pas coincées suite à une chute dans une baignoire ou un évier, incapables de remonter leurs surfaces lisses. (Bellmann, 2014; Rollard, 2021)

b. La régulation des proies

En consommant chaque jour 10 à 20 % de leur poids, les araignées jouent un rôle essentiel dans la régulation du nombre de proies dans leurs écosystèmes : Nyffeler et Birkhofer (2017) ont estimé la consommation annuelle de l'ensemble des araignées dans le monde à entre 400 et 800 millions de tonnes de proies. A l'exception de *Bagheera kiplingi* (Salticidae), unique espèce majoritairement herbivore, ainsi que de quelques espèces capables de se nourrir de nectar, l'immense majorité des espèces d'araignées est exclusivement carnivore. Le régime alimentaire des araignées est varié et dépendant de la taille de l'individu. Alors que les araignées aranéomorphes se nourrissent principalement d'insectes et autres invertébrés, les plus grandes mygales peuvent capturer des rongeurs ou des petits oiseaux. (Rollard, 2021)

Chez les araignées aranéomorphes, le régime alimentaire est rarement strict et spécifique et dépend principalement du mode de chasse. Ainsi, les araignées tissant des toiles mangent principalement des insectes volants s'accrochant dans leur piège alors que les araignées à l'affût dans les fleurs capturent des insectes pollinisateurs et que les araignées chassant activement se nourrissent des divers arthropodes qu'elles peuvent rencontrer : insectes, myriapodes, isopodes, arachnides... Il existe néanmoins des araignées spécialisées dans la chasse et la capture de certaines proies spécifiques. Par exemple, *Dysdera crocata* (Dysderidae) se nourrit préférentiellement de cloportes grâce à ses imposantes chélicères. Quelques espèces, notamment du genre *Zodarion* (Zodariidae) consomment exclusivement des fourmis. Enfin, certaines araignées (notamment dans la famille des Mimetidae) sont spécialisées dans la chasse d'autres araignées. En France, on retrouve notamment *Ero furcata*, qui fait vibrer la toile de ces futures proies afin de simuler les mouvements d'un insecte se débattant dans le piège. Cela attire l'araignée, qui est immédiatement mordue, paralysée et consommée. (Bellmann, 2014; Langenegger et al., 2019; Rollard, 2021)

c. Les prédateurs des araignées

L'impact écologique des araignées ne se limite pas à la consommation de proies. En effet, les araignées constituent une importante source de nourriture pour de très nombreuses espèces d'animaux, arthropodes (araignées, scorpions, myriapodes...) ou non (oiseaux, petits mammifères, lézards, batraciens...). (Nyffeler & Birkhofer, 2017)

Au-delà de leur appartenance occasionnelle au régime alimentaire d'espèces prédatrices, les araignées sont essentielles à la survie d'espèces extrêmement spécialisées. Nyffeler et Birkhofer (2017) ont estimé qu'entre 8 000 et 10 000 espèces prédatrices, parasitoïdes ou parasites ciblent exclusivement des araignées ou leurs œufs (**Figure 12**). La grande majorité de ces espèces appartient à l'ordre des Hyménoptères, avec une prédominance de la famille des Pompilidae (environ 5 000 espèces décrites, dont 160 en France) qui sont des prédateurs exclusifs d'araignées.

Après avoir localisé une araignée, le pompile la paralyse avec son dard et la transporte jusqu'à trouver un emplacement adapté à l'établissement de son terrier. Une fois à l'abri, le pompile pond un unique œuf directement sur l'araignée. Suite à l'éclosion, la larve se nourrit des entrailles de l'araignée paralysée, en évitant les organes vitaux afin de la maintenir en vie le plus longtemps possible. Selon leur taille, les pompiles peuvent s'attaquer à des araignées massives : par exemple, les pompiles du genre *Pepsis* consomment exclusivement des mygales. Proche des Pompilidae, la famille des *Sphecidae*, et notamment le genre *Sceliphron*, comporte des prédateurs exclusifs d'araignées. A la différence des pompiles, ces insectes construisent des loges en argile de quelques centimètres de long et y entassent jusqu'à une dizaine d'araignées destinées à nourrir une unique larve par loge. Ces loges sont parfois retrouvées dans nos habitations, notamment dans le sud de la France : sur les murs, dans les recoins d'étagères, derrière des volets... (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Rollard, 2021)



Figure 12 : Exemples d'espèces prédatrices, parasitoïdes et parasites ciblant exclusivement les araignées

(A) : Pompile du genre *Cryptocheilus* transportant une araignée (Sparassidae) paralysée.

(B) : Intérieur d'une loge en argile d'un hyménoptère du genre *Sceliphron*, comportant de nombreuses araignées paralysées vouées à alimenter une unique larve.

(C) : Cadavre d'araignée parasitée par un champignon du genre *Gibellula*.

(D) : Larve ectoparasitoïde d'un ichneumon du genre *Acrodactyla* sur une araignée de la famille des Tetragnathidae.

(Sources : (A) (Mack, 2006) ; (B) (Geller-Grimm, 2008) ; (C) (Kuephadungphan et al., 2022) ; (D) (Miller et al., 2013))

D'autres Hyménoptères, appartenant à la famille des Ichneumonidae, dépendent des araignées. A l'état larvaire, certaines espèces d'ichneumons sont des ectoparasitoïdes des araignées. L'adulte pond un œuf directement sur une araignée se tenant sur sa toile. Suite à l'éclosion, la larve s'accroche sur l'araignée et la dévore progressivement, jusqu'à la tuer. Certaines larves d'ichneumons sont quant à elles des parasitoïdes des œufs et cocons. A la différence de ces parasitoïdes qui tuent systématiquement leur hôte afin d'assurer leur développement, des espèces de nématodes sont des parasites internes d'araignées qui se nourrissent par spoliation des aliments et ne limitent que rarement la survie des araignées. Il existe également des champignons parasites ou parasitoïdes se développant spécifiquement sur les araignées, notamment dans des conditions atmosphériques très humides. (Bellmann, 2014; Nyffeler & Birkhofer, 2017; Rollard, 2021)

Enfin, les araignées, notamment mygalomorphes, sont occasionnellement consommées par l'espèce humaine : par exemple au Cambodge, les mygales *Haplopelma albobatrachum* sont élevées afin d'être frites et mangées en guise d'en-cas. (Rollard, 2021)

5. Les familles d'araignées aranéomorphes fréquemment étudiées

a. Comment trouver et capturer des araignées afin de les étudier ?

Selon le but de l'étude et selon les espèces recherchées, différentes méthodes peuvent être employées pour trouver et capturer des araignées. La recherche visuelle, bien que laborieuse, peut être nécessaire lorsque l'on cherche à observer et étudier des araignées dans leur environnement. Il faut alors rechercher des indices de la présence d'araignées, notamment des toiles et des cocons, ou encore inspecter des abris classiques tels que les faces inférieures des feuilles d'arbres, les branches, les troncs, les écorces ou encore le dessous de pierres. Une fois repérées, les araignées peuvent être directement capturées manuellement. (Bellmann, 2014; Goldsmith, 1997)

Certaines études nécessitent la capture d'un grand nombre d'araignées et ne peuvent donc pas reposer sur une simple recherche visuelle. L'utilisation d'outils ou de pièges peut ainsi grandement faciliter la capture des araignées. Un filet fauchoir, sorte de filet à papillon renforcé, permet de capturer de nombreuses espèces d'insectes et d'araignées, notamment lorsque la végétation est dense. Pour récolter la faune présente dans les arbres, on peut utiliser un parapluie japonais. En plaçant cette large toile sous un arbre et en secouant les branches, on peut récupérer de nombreux arthropodes. Il est également possible d'utiliser des aspirateurs spécifiquement adaptés à la capture d'arthropodes. Les araignées vivant sur le sol sont plus complexes à capturer et nécessitent généralement l'utilisation de pièges et tamis. Le piège le plus classique consiste en un pot enterré dans le sol, contenant ou non un appât, et permettant la chute d'arthropodes. Ce piège ne convient néanmoins pas à la

capture de certaines espèces d'araignées capables de grimper sur des surfaces lisses. Enfin, ces pièges peuvent contenir des liquides mortels pour les arthropodes, tels que l'éthylène glycol. (Bellmann, 2014; Goldsmith, 1997)

Une fois capturées, les araignées sont identifiées (famille, genre et espèce) et placées individuellement dans des boîtes ou des tubes en plastique ou en verre. Selon la durée et le mode opératoire des études, les araignées vivantes peuvent être nourries (généralement à l'aide de drosophiles ou criquets) ou bien maintenues à jeun. (Goldsmith, 1997)

A l'heure actuelle, en 2025, le World Spider Catalog recense plus de 52 000 espèces parmi les 136 familles constituant l'ordre des Araneae. Une appartient au sous-ordre des Mesothelae, 31 à l'infra-ordre des Mygalomorphae et 104 à celui des Araneomorphae. Les sous-parties suivantes ont pour but de présenter brièvement les principales familles d'araignées aranéomorphes ciblées par des études évaluant l'impact des pesticides sur les araignées. Pour chacune de ces familles, un portrait type est proposé, mais la riche diversité des espèces au sein des familles d'araignées implique qu'il existe des exceptions à ces caractéristiques générales. De manière générale, les araignées appartenant à une même famille présentent des caractéristiques anatomiques communes (nombre et disposition des yeux, forme générale du corps, longueur des pattes...) et des méthodes de chasse similaires (avec ou sans toile). (Natural History Museum Bern, 2025)

b. Exemples de familles d'araignées aranéomorphes tissant des toiles

i. Toiles orbiculaires : les Araneidae et les Tetragnathidae

Comme précisé précédemment, les araignées orbitèles tissent des toiles géométriques complexes, dites orbiculaires. Elles sont principalement regroupées au sein des familles des Araneidae et des Tetragnathidae. (Rollard, 2021)

- Les Araneidae (Figure 13)

La famille des Araneidae est cosmopolite et comporte plus de 3 500 espèces (troisième plus grande famille d'araignées), dont environ 90 sont présentes en France. Les araignées de cette famille, notamment celles appartenant au genre *Araneus*, sont communément nommées « épeires ». Les Araneidae se distinguent particulièrement par la forme régulière et géométrique des toiles verticales qu'elles tissent grâce à cinq des sept types de soies qu'elles sont capables de produire (**Figure 7**). Leur toile orbiculaire comporte un fin réseau de fils de soie en son centre, alors que le moyeu est laissé ouvert chez les Tetragnathidae. Les Araneidae recyclent quotidiennement leur toile en l'ingérant avant de la reconstruire. Elles ont huit yeux répartis en deux rangées. Néanmoins, comme pour la plupart des familles d'araignées tissant des toiles, la vue des Araneidae est mauvaise : le repérage des proies est permis par les vibrations qu'elles émettent en se débattant dans la soie gluante de la toile. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Platnick et al., 2021; Rollard, 2021)



Figure 13 : Exemples d'Araneidae communément rencontrées en France

(A) : Une épeire diadème (*Araneus diadematus*) se tenant au centre de sa toile abîmée en fin de journée.

(B) : Epeire concombre mâle (genre *Araniella*). L'abdomen des araignées femelles est généralement plus enflé, comme cela est visible sur les illustrations A, B et D.

(C) : Une argiope frelon (*Argiope bruennichi*) se tenant sur sa toile. La structure en zigzag sur la partie inférieure de la photo est un stabilimentum. Certaines espèces d'Araneidae tissent de telles structures sur leur toile, de formes variables, et de fonctions encore mal comprises : camouflage vis-à-vis des prédateurs, attraction des proies...

(D) : Epeire des fissures (*Nuctenea umbratica*) à l'entrée de sa loge (non visible, localisée derrière la tuile en haut à droite de la photographie). Le fil attaché à ses pattes droites I et II est directement relié au centre de la toile, lui permettant de percevoir les vibrations produites par une proie tout en restant cachée dans sa retraite à l'abri des prédateurs.

(Sources : (A), (C) et (D) BOSSUT Charlotte ; (B) DENIS Clément)

L'espèce d'Araneidae la plus emblématique et la plus étudiée est l'épeire diadème (*Araneus diadematus*). Cette araignée commune des jardins et lisières de forêts se tient généralement au centre de sa toile et est reconnaissable à la croix blanche qu'elle arbore sur son abdomen. Parmi les épeires françaises communes, on peut également citer l'épeire des fenêtres (*Zygiella x-notata*) que l'on retrouve principalement logée à proximité de sa toile dans le cadre des fenêtres ; l'argiope frelon (*Argiope bruennichi*) qui ne passe pas inaperçue avec ses bandes jaunes et noires dans les prairies et vignes méditerranéennes ; ou encore les épeires concombres (genre *Araniella*) bien camouflées sous les feuilles d'arbres grâce à leur abdomen vert. La répartition cosmopolite des Araneidae dans les agroécosystèmes et les zones ripariennes les expose particulièrement aux pesticides agricoles. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021)

- Les Tetragnathidae (Figure 14)

La famille des Tetragnathidae comporte près de 1 000 espèces, dont une vingtaine sont présentes en France. Les toiles orbitèles des Tetragnathidae se distinguent de celles des Araneidae par leur moyeu ouvert, par leur nombre faible de rayons, ainsi que par leur orientation inclinée (voire horizontale !). Tout comme les Araneidae, elles disposent de huit yeux répartis en deux rangées, mais leur corps est généralement bien plus allongé et leurs chélicères plus imposantes. Les araignées de cette famille, et notamment celles appartenant au genre *Tetragnatha* – genre regroupant un tiers des espèces de la famille – vivent principalement dans la végétation bordant les cours d'eau et les mares. Les Tetragnathidae sont donc des sujets d'étude pertinents pour évaluer la pollution environnementale dans les zones ripariennes. (Bellmann, 2014; Chumchal et al., 2022; Eyssartier et al., 2021; Graf et al., 2019; Platnick et al., 2021)



Figure 14 : Une Tetragnathidae au centre de sa toile inclinée

Caractéristique commune à toutes les Tetragnathidae, la toile de cette araignée du genre *Tetragnatha* comporte un moyeu ouvert : les rayons de la toile orbiculaire sont reliés par de nombreux fils de soie, sauf au niveau de son centre, où l'araignée se tient. Son corps allongé la distingue des Araneidae, qui ont un corps plus trapu (**Figure 13**).

(Source : BOSSUT Charlotte)

ii. Toiles en nappe : les Linyphiidae

Avec plus de 4 600 espèces dans le monde (500 en France), la famille des Linyphiidae est la deuxième famille d'araignées la plus diversifiée. Elle regroupe des araignées de très petites tailles : la taille de leur corps n'est que rarement supérieure à trois millimètres ! Cette petite taille leur permet parfois de se déplacer, même à l'âge adulte, par « ballooning ». On les retrouve généralement dans les prairies agricoles ou en forêt, où elles tissent dans la végétation basse de larges toiles en nappe composées d'un réseau dense de fils entremêlés dépourvus de glu (**Figure 15**). Au-dessus de la toile, l'araignée tisse quelques fils visant à déstabiliser le vol des insectes, afin de les faire chuter dans le piège en contrebas. La proie s'emmêle dans le réseau de fils et alerte l'araignée située sur la face inférieure, qui la mord à travers la toile et l'emmailote. Certaines espèces de Linyphiidae, telles que *Lepthyphantes tenuis*, sont des auxiliaires des cultures en se nourrissant principalement de pucerons et sont donc exposés aux produits phytosanitaires. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Haughton, Bell, Boatman, et al., 2001; Haughton, Bell, Wilcox, et al., 2001)

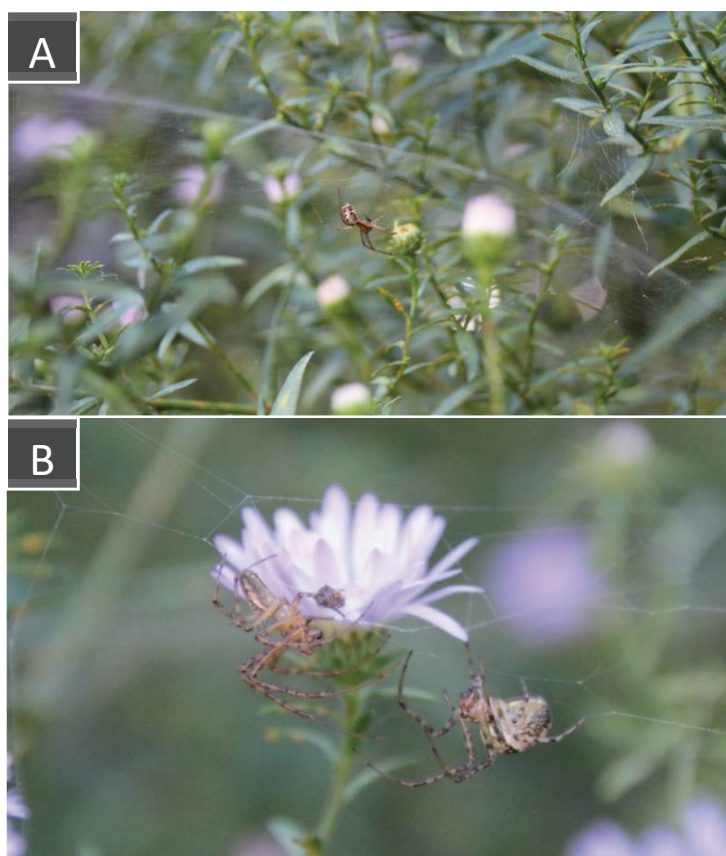


Figure 15 : Toile en nappe et cohabitation chez les Linyphiidae

(A) : *Linyphia triangularis* est une Linyphiidae commune en Europe, qui construit sa toile en nappe dans les plantes basses. On remarque les quelques fils de soie construits au-dessus de la toile afin d'intercepter les insectes volants (notamment à droite sur la photographie).

(B) : En début d'automne, lors de la période nuptiale, les Linyphiidae femelles peuvent tolérer la présence de mâles sur sa toile. Ici, un mâle (à gauche) s'empare d'une proie emmaillotée par la femelle.

(Source : BOSSUT Charlotte)

iii. Toiles en dôme ou irrégulières : les Theridiidae

La famille des Theridiidae compte plus de 2 400 espèces, dont 120 sont retrouvées en France. Les Theridiidae sont de petites araignées à l'abdomen globuleux tissant près du sol des toiles tridimensionnelles très irrégulières, plus ou moins en forme de dôme. Les fils des toiles présentent de la glu, permettant une capture efficace des proies. Divers comportements maternels ont été recensés dans cette famille d'araignées : stockage de proies avant l'éclosion ; ouverture du cocon par la mère ; régurgitation de proies pour alimenter les petits... (Barrantes & Weng, 2009; Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021)

Les Theridiidae sont présentes dans des environnements très variés et certaines espèces sont fréquemment retrouvées dans nos habitations : les araignées du genre *Steatoda* (**Figure 16, A**) ou « fausses-veuves », sont particulièrement communes dans les maisons occidentales où elles tissent leur toile sous des meubles rarement déplacés. Elles limitent ainsi la persistance d'insectes dans les habitations tout en étant inoffensives pour les êtres humains. La famille des Theridiidae comporte également les « veuves », du genre *Latrodectus*, qui possèdent quant à elles un venin neurotoxique particulièrement puissant représentant un risque pour l'Homme. L'unique représentante en France métropolitaine, la malmignatte (*Latrodectus tredecimguttatus*, **Figure 16, B**), vit dans les friches et maquis du littoral méditerranéen et en Corse. Contrairement à cette espèce qui n'est qu'exceptionnellement au contact de l'homme, la célèbre veuve noire d'Amérique du Nord (*Latrodectus mactans*) s'installe fréquemment dans les habitations rurales, augmentant le risque de morsures entraînant des conséquences potentiellement graves. A cause du risque potentiel qu'elles représentent, les Theridiidae vivant dans nos habitations peuvent alors être la cible de biocides à usage domestique, tandis que celles vivant dans les champs et prairies sont exposées aux pesticides agricoles. (Bellmann, 2014; Platnick et al., 2021)

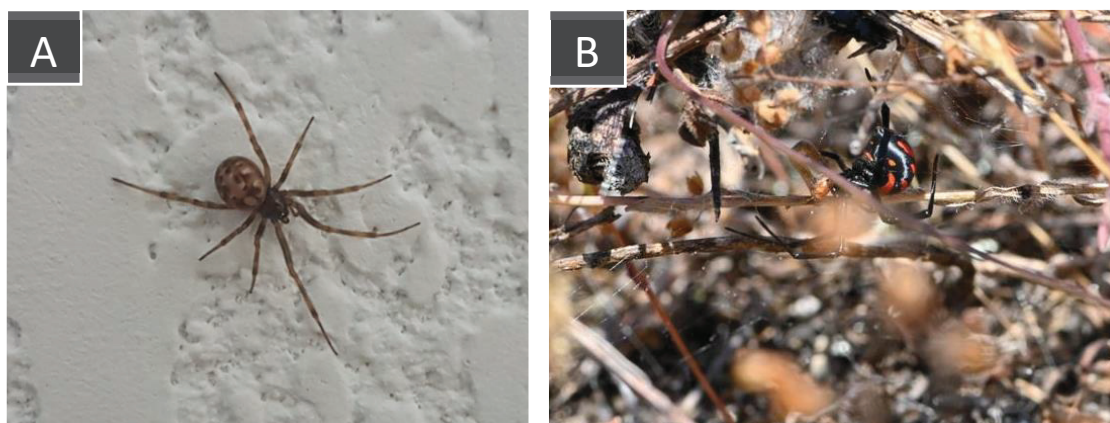


Figure 16 : Les Theridiidae, entre « fausses-veuves » et « veuves »

(A) : *Steatoda triangulosa*, « fausse-veuve » couramment retrouvée dans nos habitations et inoffensive pour l'espèce humaine.

(B) : La malmignatte (*Latrodectus tredecimguttatus*), unique « veuve » française, possède quant à elle un puissant venin neurotoxique. Contrairement à l'espèce précédente, elle ne vit heureusement que très rarement à proximité des lieux anthropisés.

(Sources : (A) DENIS Clément ; (B) MONTARDI Y. (INPN, 2014b))

iv. Toiles en entonnoir : les Agelenidae

La famille des Agelenidae compte plus de 1 300 espèces dans le monde et en est représentée par une cinquantaine en France. Ces araignées ont de longues pattes de taille égale et un abdomen plus long que large, à l'extrémité duquel se trouvent des filières très allongées. Les Agelenidae tissent de grandes toiles en entonnoir horizontal conduisant vers une loge tubulaire au sein de laquelle elle se tiennent à l'affût des vibrations produites par une proie. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021)

Bien qu'impressionnantes par leur grande envergure et leur vitesse (jusqu'à 50 centimètres par seconde !), ces araignées sont très craintives et leurs rares morsures n'entraînent aucune conséquence sérieuse chez les individus non allergiques. En extérieur, on les retrouve dans les forêts, dans les cavités naturelles ou encore dans la végétation basse où *Agelena labyrinthica* abonde (**Figure 17, A et B**). Cette famille comporte également les « tégénaires » (genres *Tegenaria* et *Eratigena* notamment), araignées bien connues car très fréquemment retrouvées dans nos habitations (**Figure 17, C**). Les tégénaires tissent dans des recoins sombres et peu fréquentés, mais la recherche d'une partenaire en automne (ou le manque de nourriture) amène les mâles à vagabonder dans des pièces plus fréquentées. Elles jouent un rôle important dans l'élimination des insectes « nuisibles » se trouvant dans nos habitations. Au cours de leurs prospections, il n'est pas rare qu'elles chutent dans les baignoires et éviers, incapables de remonter leurs parois lisses car elles ne disposent pas de soies adhésives à l'extrémité de leurs pattes : contrairement à la croyance populaire, elles ne proviennent pas des canalisations ! (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Gaver-Wainwright et al., 2011; Platnick et al., 2021; Rollard, 2021)



Figure 17 : Agelenidae communes de nos jardins et habitations

(A) : *Agelena labyrinthica* à l'entrée de sa retraite en entonnoir...

(B) : ... puis sur la partie en nappe de sa toile, attirée par les mouvements d'une proie.

(C) : Les tégénaires (ici, *Eratigena sp.*), araignées très communes de nos maisons, jouent un rôle important dans la lutte contre les arthropodes au sein de nos habitations. Leur grande taille et leur aspect peuvent effrayer au premier regard, mais les tégénaires sont des araignées craintives dont la rare morsure n'entraîne aucune conséquence chez les individus non allergiques.

(Source : BOSSUT Charlotte)

Les toiles des Agelenidae, larges et denses, ne sont ni recyclées ni détruites par les araignées. Au fil du temps, des particules (matières organiques, poussières, mais aussi des polluants tels que des métaux lourds) peuvent donc s'y accumuler (**Figure 17, B**). La présence des Agelenidae dans des milieux anthropiques et les caractéristiques de leurs toiles font de ces araignées des sujets pertinents pour les études portant sur l'évaluation de la qualité de l'air en milieu urbain. De plus, tout comme certaines Theridiidae, la mauvaise réputation des tégénaires vivant dans nos maisons les expose aux biocides à usage domestique. (Rybak, 2015; Stojanowska et al., 2023)

c. Exemples de familles d'araignées aranéomorphes pratiquant la chasse à l'approche

Les familles suivantes ne chassent pas à l'aide d'une toile, mais parcourent leur environnement à la recherche de proies. Néanmoins, ces araignées produisent tout de même de la soie dans d'autres contextes : fabrication du cocon, ballooning, fil de traîne (fil placé sur un support en hauteur afin de pouvoir descendre en rappel)... (Rollard, 2021)

i. Les Salticidae

La plus grande famille d'araignées est celle des Salticidae (**Figure 18**) : avec plus de 5 500 espèces (dont 160 retrouvées en France), cette famille regroupe près de 10 % des espèces d'araignées décrites à ce jour ! Les Salticidae sont de petites araignées présentant une grande diversité de motifs et colorations. Elles disposent de huit yeux qui leur confèrent une excellente vision à 360° et sont caractérisées par la taille très importante de leurs yeux médians antérieurs, dont la rétine mobile permet une mise au point et une variation de l'angle de vue sans déplacement de l'araignée. Les Salticidae sont communément nommées « araignées sauteuses » car elles présentent la capacité de se déplacer dans leur environnement en sautant, ainsi que de bondir sur les proies qu'elles chassent à l'approche. Avant chaque saut, elles ancrent un fil de traîne au substrat afin d'y remonter en cas de chute. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Platnick et al., 2021)

La famille des araignées sauteuses est très diversifiée et cosmopolite. En France, on retrouve des espèces très communes dans nos jardins et forêts, telles que *Marpissa muscosa*, *Salticus scenicus* ou encore *Carrhotus xanthogramma*. Certaines espèces telles que *Saitis barbipes* réalisent des parades nuptiales complexes au cours de laquelle elles agitent leurs pattes et pédipalpes colorés. Comme développé précédemment, ce comportement est poussé à l'extrême chez les araignées paon mâles (genre *Maratus*, notamment *Maratus volans*) qui captent l'attention des femelles au cours d'une danse mettant en avant leur abdomen et pattes très colorés. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Rollard, 2021)

La grande diversité des espèces au sein des Salticidae implique une grande diversité de morphologies et de comportements. Par exemple, on retrouve en Amérique latine *Bagheera kiplingi*, unique araignée majoritairement herbivore décrite, qui se nourrit d'excroissances sucrées situées sur les feuilles d'acacias. Chez les Salticidae, il existe également des araignées dites myrmécomorphes (notamment au sein du genre *Myrmarachne*) qui ressemblent à s'y méprendre à des fourmis. Elles disposent généralement d'un corps très allongé présentant des constrictions sur le céphalothorax ou l'abdomen, évoquant la segmentation du corps des insectes. De plus, elles se déplacent à la manière des fourmis en alternant des phases de course et des phases de pause, au cours desquelles elles lèvent et agitent leur paire antérieure de pattes afin de simuler le mouvement des antennes des insectes ! Les fourmis ont un goût désagréable pour de nombreux prédateurs, qui évitent donc la consommation de ces insectes : ce mimétisme limite alors la prédation des araignées myrmécomorphes. Chez certaines espèces, le mimétisme permet également de se mêler à la fourmilière afin de consommer des fourmis ou leurs larves. (Platnick et al., 2021; Rollard, 2021)

Une fois encore, les principales Salticidae exposées aux pesticides sont celles vivant dans les agroécosystèmes : champs, prairies, mais aussi vignes et vergers où certaines espèces abondent particulièrement. (Reiff et al., 2024; Schmidt-Jeffris et al., 2022)

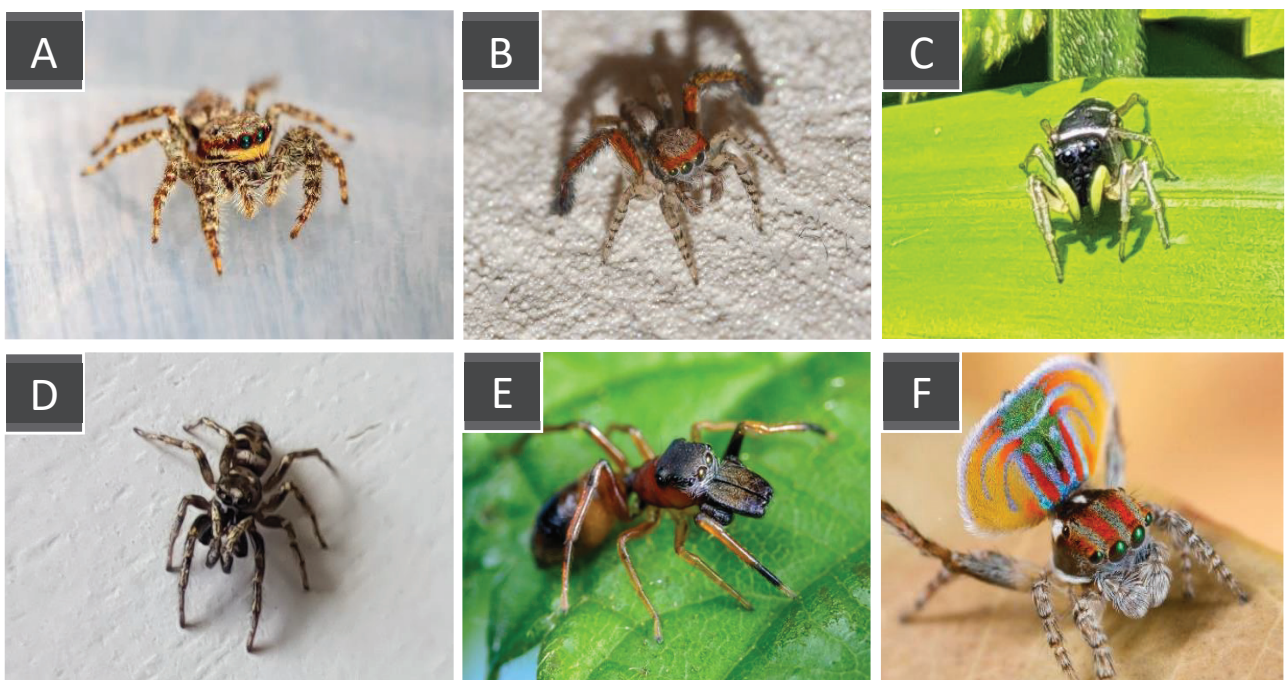


Figure 18 : Diversité au sein de la grande famille des araignées sauteuses (Salticidae)

- (A) : La très commune *Marpissa muscosa* est une des plus grandes Salticidae de France. La femelle arbore une moustache orange crème sous ses yeux.
- (B) : La troisième paire de pattes du mâle *Saitis barbipes* est colorée et touffue. Il les agite au cours de sa parade nuptiale, afin d'attirer l'attention de la femelle.
- (C) : Cette *Heliophanus cupreus* femelle a repéré le photographe et fixe l'objectif. Les Salticidae sont des araignées très curieuses, susceptibles d'interagir avec les humains.

- (D) : Ce mâle du genre *Salticus* cache ses imposantes chélicères derrière ses pédipalpes.
- (E) : Contrairement aux quatre araignées précédentes très communes en France, il est plus rare d'observer des Salticidae myrmécomorphes telles que cette *Myrmarachne formicaria*. Les araignées myrmécomorphes ressemblent à des fourmis avec leurs corps allongé et imitent même leur locomotion. Ce mimétisme de protection limite leur prédation.
- (F) : Les araignées paons du genre *Maratus* ne sont pas présentes en France. A l'image de *Saitis barbipes*, les couleurs vives du mâle jouent un rôle primordial dans la parade nuptiale.
- (Sources : (A) (Vidril, 2022) ; (B) (Mahé, 2021) ; (C) et (D) DENIS Clément ; (E) (Helwig, 2012) ; (F) (Jurgen, 2014))

ii. Les Lycosidae

La famille des Lycosidae regroupe environ 2 500 espèces (120 en France), communément nommées « araignées-loups ». Les araignées-loups sont des araignées de taille moyenne à grande qui vivent sur le sol et chassent à l'approche, sans toile de capture. Elles disposent de huit yeux leur conférant une bonne vision, mais à l'inverse des Salticidae ce sont les quatre yeux postérieurs qui sont de plus grande taille. Les Lycosidae femelles présentent des comportements maternels variés (**Figure 9**). Elles transportent ainsi leur cocon avec leurs filières situées à l'extrémité caudale de l'abdomen. Suite à l'éclosion, les petits grimpent sur l'abdomen de leur mère, qui les transporte quelques jours jusqu'à leur première mue avant leur dispersion. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021)

Les Lycosidae sont très communes et sont les principales araignées retrouvées à même le sol. La majorité des espèces vit dans des milieux secs et ensoleillés, tels que les garrigues et les prairies sèches. C'est le cas de la célèbre tarentule² (*Lycosa tarantula*, **Figure 19, A**), principalement présente en Italie, ainsi que dans le sud-est de la France. Cette très grande araignée-loup, dont le corps (sans les pattes) mesure entre deux et trois centimètres, ne mérite pas sa mauvaise réputation. Effectivement, la tarentule est principalement nocturne et passe la journée en profondeur dans son terrier, qui peut atteindre jusqu'à 30 centimètres de profondeur. De plus, bien que sa morsure soit douloureuse, son venin n'est pas particulièrement toxique pour les êtres humains, contrairement à la malmignatte (*Latrodectus tredecimguttatus*, Theridiidae) qui partage son aire de répartition. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Platnick et al., 2021)

A l'inverse de la tarentule, certaines espèces fréquentent les habitats forestiers, les prairies humides et les berges. Les araignées du genre *Pirata*, capables de se déplacer sur l'eau, se nourrissent d'insectes le long de la berge ou à la surface de l'eau. Certaines espèces peuvent même plonger pour capturer des larves d'insectes ou des têtards. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Platnick et al., 2021)

² L'usage fréquent du mot « tarentule » pour désigner les araignées mygalomorphes est incorrect : les tarentules sont des araignées aranéomorphes de la famille des Lycosidae. La confusion provient probablement de l'anglais, où les mygales sont effectivement nommées « *tarantulas* ».

Les araignées-loups du genre *Pardosa* (**Figure 19, B**) sont très communes dans les agroécosystèmes (prairies et champs cultivés) et sont donc particulièrement exposées aux pesticides agricoles. Les Lycosidae, et notamment le genre *Pardosa*, font ainsi l'objet de nombreuses études portant sur l'impact des pesticides agricoles sur les araignées aranéomorphes. (Niedobová et al., 2016, 2019; Ward et al., 2022)

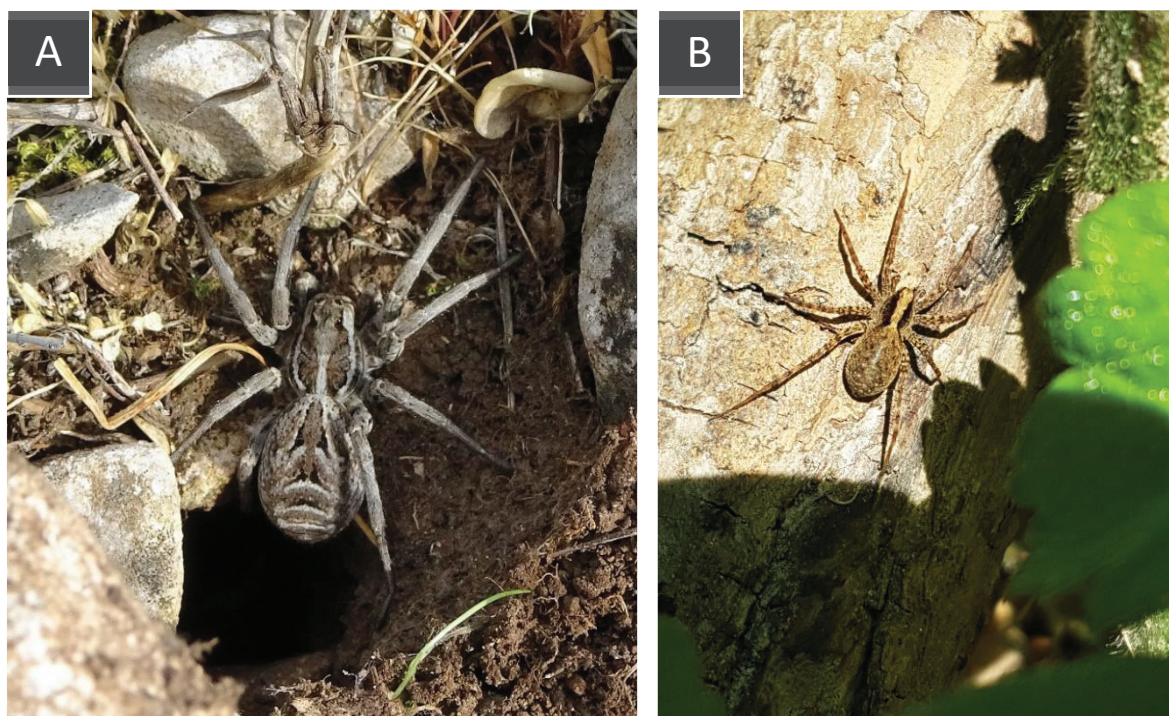


Figure 19 : Les Lycosidae, principales araignées chassant au sol

(A) : *Lycosa tarantula* à l'entrée de son terrier. La grande taille de la tarentule est à l'origine d'une crainte infondée : la morsure de cette espèce nocturne est rare et son venin est peu toxique pour les êtres humains.

(B) : Bien plus communes, les araignées-loups du genre *Pardosa* sont particulièrement répandues sur le sol des forêts, prairies et champs. Lors d'une promenade en forêt, on peut fréquemment les voir courir parmi les feuilles mortes, effrayées par nos pas.

(Sources : (A) (Bounias-Delacour, 2014) ; (B) DENIS Clément)

iii. Les Philodromidae

Avec 540 espèces recensées dans le monde, dont 80 en France, les Philodromidae forment une petite famille très proche de celle des Thomisidae (présentée ci-après). Les araignées de ces deux familles présentent des caractéristiques communes : elles sont de petite à moyenne taille, avec un corps aplati et des pattes étalées sur les côtés. Néanmoins, alors que les Thomisidae chassent à l'affût sur des fleurs, les Philodromidae chassent à l'approche sur des végétaux ou sur le sol. La disposition de leurs pattes leur permet de se déplacer très rapidement dans toutes les directions. Leur méthode de chasse consiste en des déplacements vifs entrecoupés d'arrêts soudains au cours desquels elles s'aplatissent pour se confondre dans la végétation (**Figure 20**), jusqu'à arriver à proximité d'une proie sur laquelle elles se ruent. Les araignées du genre *Philodromus* vivent sur les arbres et arbustes des

forêts, mais sont également très communes dans les vergers où elles jouent un rôle important en tant que prédateurs d'insectes ravageurs. Ce milieu de vie les expose néanmoins à des produits phytosanitaires. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Petcharad et al., 2018; Sentenská et al., 2021)



Figure 20 : Philodromidae camouflée parmi le lichen

Les Philodromidae chassent en se déplaçant par à-coups. A chaque pause, elles s'immobilisent et s'aplatissent pour se dissimuler dans la végétation. Cette araignée du genre *Philodromus* présente un remarquable camouflage lui permettant de se fondre parmi le lichen recouvrant son milieu de chasse (généralement un arbre ou un rocher). (Source : Touroult, 2014)

d. La principale famille d'araignées aranéomorphes chassant à l'affût : les Thomisidae

A la différence des familles présentées précédemment, les Thomisidae ne chassent ni avec une toile, ni à l'approche. Cette grande famille, qui compte plus de 2 400 espèces (120 en France), regroupe des araignées spécialistes de la chasse à l'affût. Leur morphologie est proche de celle des Philodromidae, mais elles s'en distinguent par la longueur démesurée de leur deux premières paires de pattes. Cette particularité anatomique et la disposition latérale de leurs pattes leur valent le surnom d'« araignées-crabes ». Les Thomisidae sont généralement camouflées sur des fleurs et tiennent leurs deux premières paires de pattes étendues à l'affût d'un insecte volant (**Figure 21**). Dès qu'un butineur s'approche de l'araignée, elle l'agrippe avec ses longues pattes antérieures avant de le mordre près de la tête pour lui injecter un venin à action particulièrement rapide. Ce venin très efficace permet aux Thomisidae de s'attaquer à des proies bien plus massives qu'elles, telles que des abeilles et des papillons. La plupart des Thomisidae présentent un camouflage particulièrement

efficace en se positionnant sur une fleur ou une plante de même couleur que leur corps : on parle d'homochromie. Ce camouflage est poussé à l'extrême chez certaines espèces où la femelle possède la capacité de changer de couleur en quelques jours afin de mieux correspondre à celle de son support. Ainsi, la thomise variable (*Misumena vatia*) peut passer du jaune au blanc et inversement, tandis que la thomise enflée (*Thomisus onustus*) dispose d'une troisième couleur avec le rose. (Bellmann, 2014; Eyssartier et al., 2021; Platnick et al., 2021; Rollard, 2021)

Les Thomisidae sont des araignées très communes en milieu rural, dans les prairies et les champs. Comme la plupart des familles présentées précédemment, elles sont donc particulièrement exposées aux pesticides agricoles. (Bellmann, 2014; Gabellone et al., 2022)

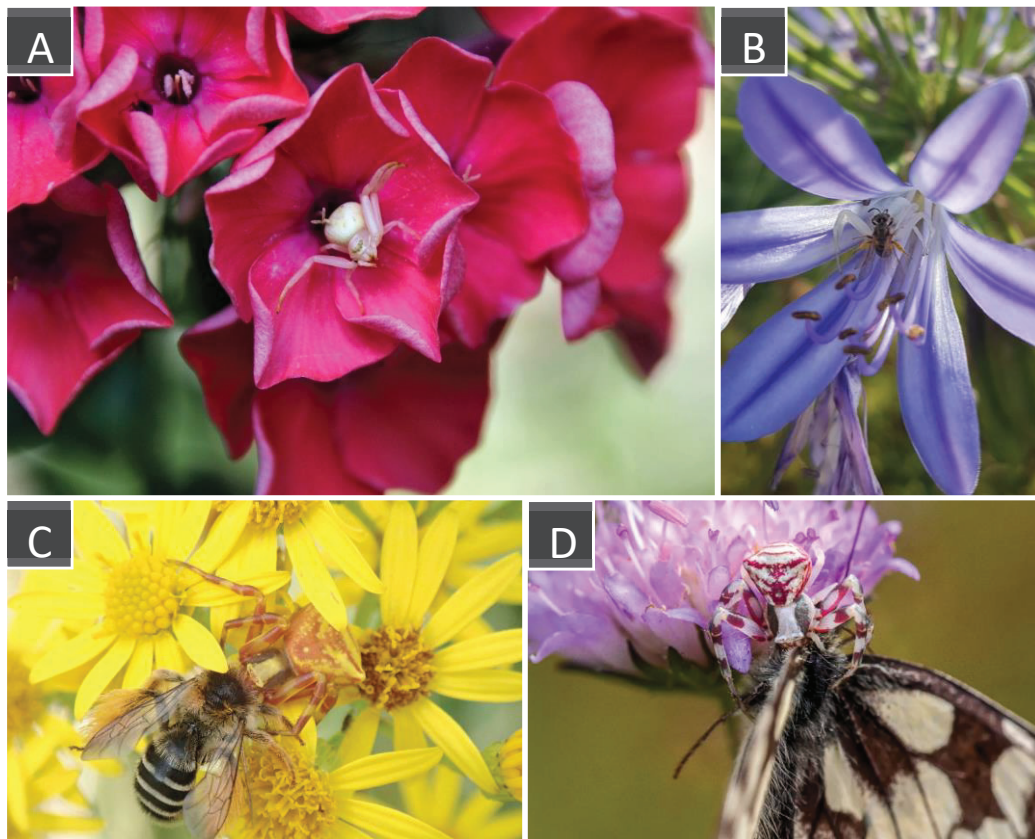


Figure 21 : Chasse à l'affût et variation de couleur chez les Thomisidae

- (A) : *Misumena vatia* dans la posture typique de chasse des Thomisidae : à l'affût sur une fleur, les deux premières paires de pattes largement écartées, l'araignée est prête à capturer et mordre un insecte butineur volant trop près d'elle.
- (B) : Avec sa couleur blanche, cette thomise variable (*Misumena vatia*) est bien camouflée dans cette fleur aux couleurs pâles, ce qui lui a permis de capturer un insecte pollinisateur.
- (C) : Cette thomise enflée (*Thomisus onustus*) a modifié sa couleur en quelques jours afin de se fondre parmi les pétales et étamines des fleurs sur lesquelles elle chasse.
- (D) : Alors que *Misumena vatia* ne peut varier qu'entre le blanc et le jaune, cette *Thomisus onustus* arbore une troisième couleur : le rose. Cette photographie illustre également la capacité des Thomisidae à terrasser des insectes bien plus grands qu'elles à l'aide de leur venin agissant très rapidement.

(Sources : (A) BOSSUT Charlotte ; (B) DENIS Clément ; (C) (Lopez Vaamonde, 2021) ; (D) (Vidril, 2023))

II. Notions générales concernant les pesticides pouvant avoir un impact sur les araignées aranéomorphes

1. Catégorisation des pesticides selon leur site d'application

L'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee) définit les pesticides comme des « substances ou produits destinés à lutter contre les organismes jugés nuisibles, qu'il s'agisse de plantes, d'animaux, de champignons ou de bactéries » (« Définition - Pesticides », 2021). Alors que cette définition des pesticides au sens large englobe tout aussi bien les produits à usage agricole que ceux à usage domestique et professionnel, le terme « pesticides » est généralement réduit à son sens strict dans la littérature et ne désigne alors souvent que les produits phytosanitaires. Le manque de précision des définitions des différents types de pesticides dans les textes réglementaires est à l'origine d'une grande diversité de catégorisations de ces substances dans la littérature. Cette sous-partie propose ainsi une catégorisation des pesticides selon leur site d'application : les produits phytosanitaires sont employés sur les végétaux, les produits antiparasitaires vétérinaires sur les animaux et les produits biocides sur des surfaces inertes ou directement sur les organismes nuisibles (**Figure 22**). Les produits antiparasitaires à usage humain ne seront pas développés dans ce travail.

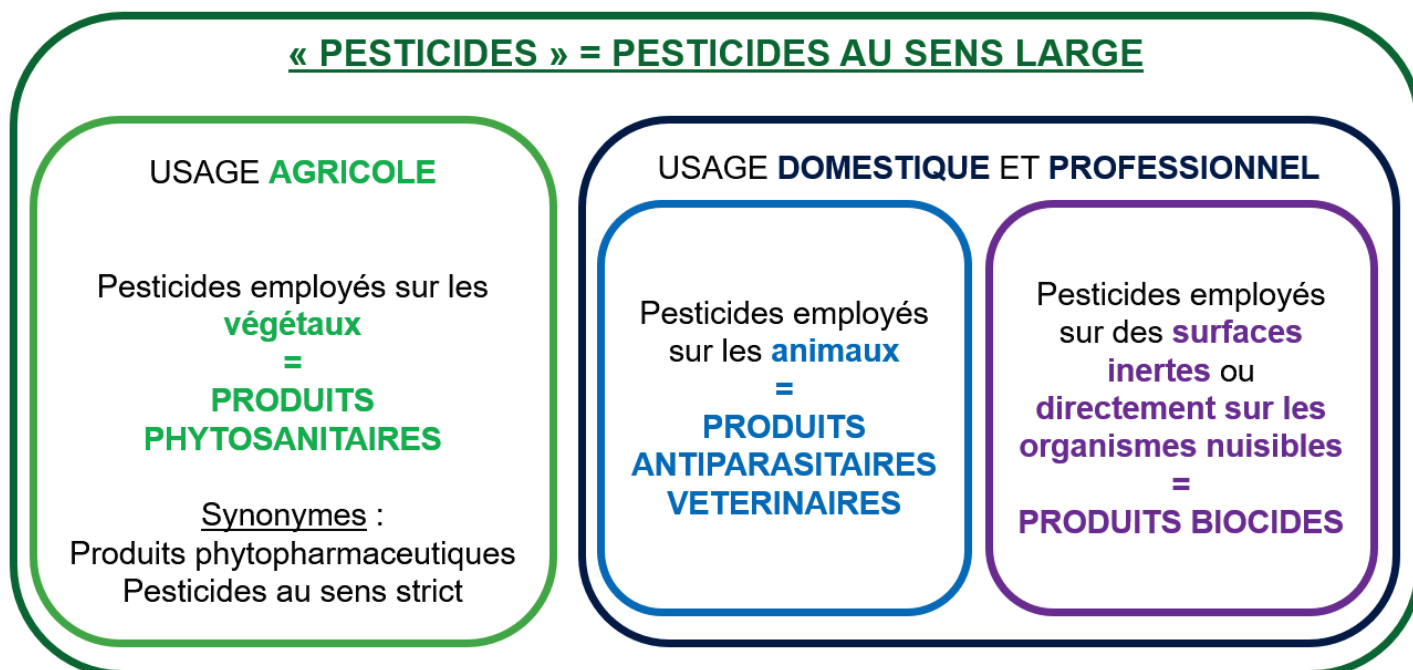


Figure 22 : Proposition de catégorisation des pesticides selon leur site d'application

Le terme « pesticides », ou pesticides au sens large, regroupe trois principales catégories de substances. Les pesticides à usage agricole sont employés sur des végétaux et sont nommés produits phytosanitaires, produits phytopharmaceutiques ou encore pesticides au sens strict. Les pesticides à usage domestique et professionnel regroupent les produits antiparasitaires vétérinaires employés sur des animaux et les produits biocides employés sur des surfaces inertes ou directement sur les organismes nuisibles.

(Source : DENIS Clément)

a. Les pesticides employés sur les végétaux : les produits phytosanitaires

Les pesticides les plus employés sont les produits à usage agricole, au point que ces substances soient généralement simplement désignées par le mot « pesticides » (au sens strict) dans la littérature. Les produits phytosanitaires jouent un rôle très important dans l'agriculture en améliorant le rendement et la qualité des cultures. Alors que près de quatre millions de tonnes de pesticides agricoles sont utilisées annuellement dans le monde, Bernardes et al. (2015) estiment que moins d'1 % de ces produits atteignent les organismes nuisibles ciblés. L'immense majorité des produits phytosanitaires est donc perdue dans l'environnement ou atteint des organismes non ciblés. (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 2024; Tudi et al., 2021)

Les produits phytosanitaires sont très variés et sont notamment classés selon leurs cibles et leurs caractéristiques chimiques. La grande diversité des cultures agricoles implique une diversité importante d'organismes nuisibles, motivant l'utilisation de produits variés : herbicides, insecticides, acaricides, fongicides, mais également rodenticides ou encore molluscicides. Alors que la plupart des produits phytopharmaceutiques visent l'élimination directe des nuisibles, certains agissent en tant que régulateurs de croissance ou sont de simples répulsifs. Pour assurer ces différents rôles, les pesticides agricoles sont constitués d'au moins une substance active, organique ou non (cuivre, soufre...), et d'adjuvants. Les pesticides organiques sont extrêmement divers et classés selon leurs structures chimiques. Pour les insecticides, on citera principalement les néonicotinoïdes (notamment l'imidaclopride), les organophosphorés, les pyréthrianoïdes ou encore les organochlorés. Les principaux herbicides utilisés à l'échelle mondiale sont le glyphosate, l'acide 2,4-dichlorophénoxyacétique (couramment nommé 2,4-D), ainsi que l'atrazine. (Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA), 2025; Tudi et al., 2021)

Les produits phytosanitaires sont préparés sous forme liquide (suspensions, aérosols...), solide (granulés, poudres...) ou plus rarement gazeuse (fumigants). Ces nombreuses formulations permettent une utilisation adaptée à l'espèce nuisible ciblée et au type de culture concerné. Les adjuvants sont des composés améliorant les caractéristiques physico-chimiques des produits phytosanitaires, notamment ceux sous forme liquide. Par exemple, les surfactants (également nommés tensio-actifs) assurent la stabilité des produits tout en permettant une meilleure diffusion et absorption des principes actifs par les organismes cibles. Alors que les adjuvants ne jouent normalement qu'un rôle structurel, certains surfactants présentent une toxicité envers les organismes cibles ou non-cibles, amplifiant l'écotoxicité des produits phytosanitaires. (Niedobová et al., 2016)

Malgré la toxicité environnementale causée par la majorité des produits phytosanitaires, l'utilisation mondiale des pesticides à usage agricole est en constante augmentation et a doublé entre 1990 (1,81 million de tonnes (Mt)) et 2022 (3,69 Mt) (**Figure 23, A**). En 2022, les principaux utilisateurs de produits phytosanitaires étaient le Brésil (0,800 Mt) et les Etats-Unis (0,467 Mt), tandis que la France était en dixième

position mondiale avec une utilisation s'élevant à 0,067 millions de tonnes (**Figure 23, B**). (Statista, 2024a, 2024b)

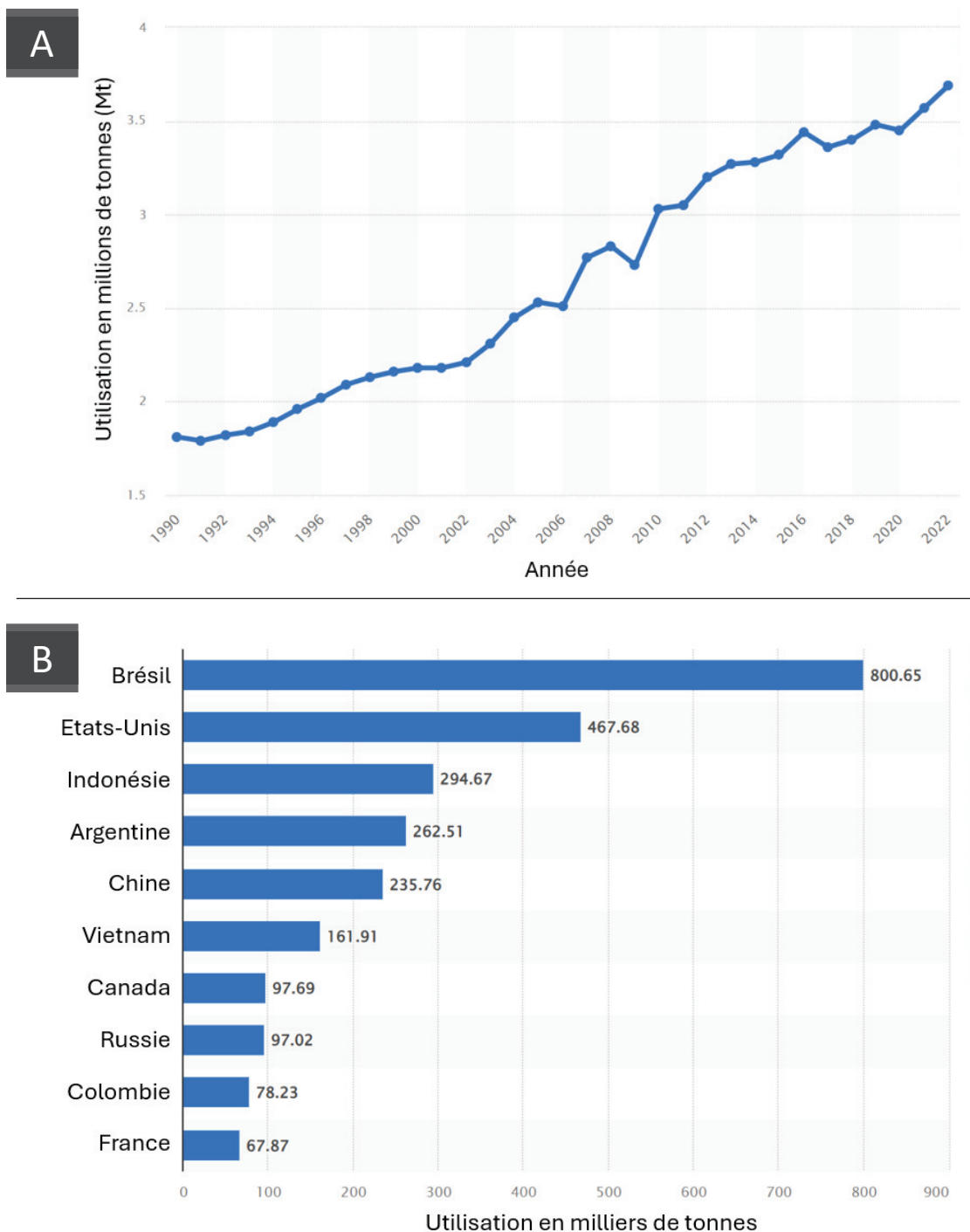


Figure 23 : Evolution et quantification de l'utilisation mondiale des produits phytosanitaires

(A) : Evolution de l'utilisation mondiale de pesticides à usage agricole entre 1990 et 2022.

L'utilisation est en constante augmentation et a doublé en 30 ans.

(B) : Principaux pays utilisateurs de produits phytosanitaires à l'échelle mondiale en 2022. Le Brésil et les Etats-Unis dominent le classement ; la France est en dixième position.

(D'après Statista, 2024a, 2024b)

b. Les pesticides employés sur les animaux : les produits antiparasitaires vétérinaires

Les animaux domestiques sont les hôtes de divers parasites. Les ectoparasites ou parasites externes, sont des arthropodes vivant à la surface de la peau ou au sein de l'épiderme de l'hôte. Par exemple en France, les chiens et chats sont fréquemment parasités par des puces et des tiques, les vaches par des poux et les chevaux par des mouches plates (*Hippobosca equina*). Les endoparasites sont quant à eux des parasites internes, vivant à l'intérieur du corps des hôtes, généralement au sein de leur tube digestif. On retrouve des vers ronds (nématodes) tels que les ascaris et les strongles, des vers plats (cestodes et trématodes) tels que *Dipylidium caninum* chez les carnivores domestiques ou *Fasciola hepatica* chez les ruminants, et des protozoaires digestifs et sanguins tels que les agents de piroplasmose et de toxoplasmose. L'impact du parasitisme chez les animaux domestiques est très variable selon le type de parasite et la gravité de l'infestation : les signes cliniques peuvent ainsi être discrets (inconfort, prurit...), modérés (diarrhée, abattement, baisse de production laitière...) ou graves voire amener au décès de l'animal (parasitisme intense chez un jeune, piroplasmose...). De plus, certains parasites des animaux domestiques peuvent se transmettre aux êtres humains : on parle de zoonose parasitaire. Par exemple, les chiens atteints de gale sarcoptique peuvent transmettre *Sarcoptes scabiei* à leurs propriétaires, tandis que l'ingestion de viande bovine infestée par *Tænia saginata* (une espèce de « ver solitaire ») peut être à l'origine de téniasis humaine. (Conseil scientifique européen sur les parasites des animaux de compagnie (ESCCAP), 2025)

Le parasitisme des animaux domestiques est donc un problème d'ordre médical pour les animaux, d'ordre économique pour les éleveurs et également un problème de santé publique avec les zoonoses parasitaires. En réponse, de nombreux produits antiparasitaires à visée préventive ou curative sont utilisés. On peut classer les pesticides employés sur les animaux selon leur cible : les antiparasitaires externes (APE) luttent contre les insectes et acariens ; les antiparasitaires internes (API, couramment nommés vermifuges) luttent contre les vers et les protozoaires ; enfin, les endectocides sont des pesticides combinant une action APE et API, tels que les molécules de la classe des lactones macrocycliques. La diversité des parasites internes des mammifères domestiques fait que les API sont très variés et spécifiques. Face à l'absence d'études s'intéressant à l'impact des API sur les araignées aranéomorphes, cette catégorie de médicaments antiparasitaires vétérinaires ne sera pas davantage développée dans ce travail. (Wells & Collins, 2022)

Les APE sont principalement des pesticides insecticides et acaricides. Les molécules employées étaient initialement les mêmes que celles constituant les produits phytosanitaires (organochlorés, organophosphorés, carbamates...), puis elles ont été peu à peu remplacées suite à la synthèse de molécules plus sûres pour les mammifères et présentant moins de résistance parasitaire. De nos jours, les principales molécules utilisées appartiennent aux familles des isoxazoline, des

néonicotinoïdes et des pyréthrianoïdes, ou sont des molécules endectocides (lactones macrocycliques). Bien que la majorité des traitements APE tuent les arthropodes en ciblant leur système nerveux, certains agissent de façon préventive en empêchant la croissance des larves ou en limitant la capacité de mue des arthropodes. Pour les carnivores domestiques, les produits se présentent sous trois formes principales : comprimés, pipettes à appliquer en spot-on et colliers. La galénique des médicaments antiparasitaires des animaux de rente est plus variée avec des solutions buvables, des solutions à appliquer en pour-on, des bolus ou encore des formes injectables. (Selzer & Epe, 2021; Wells & Collins, 2022)

La population mondiale de carnivores domestiques est estimée à près d'un milliard d'animaux et est en constante augmentation. Le rapport le plus récent de la Fédération Européenne de l'Industrie des Aliments pour Animaux Familiers (FEDIAF, publié en 2025) dénombre 108 millions de chats et 90 millions de chiens en Europe en 2023. L'augmentation du nombre de carnivores domestiques implique une augmentation mondiale de l'utilisation de médicaments antiparasitaires vétérinaires et une possible exposition de ces molécules à des organismes non-cibles tels que les araignées. Par exemple, Diepens et al. (2023) ont montré que les chiens traités par des antiparasitaires peuvent contaminer l'environnement aquatique suite à une baignade et peuvent également exposer des oisillons aux pesticides lorsque leurs parents utilisent des poils de chiens pour aménager leurs nids. Néanmoins, la contamination environnementale par des pesticides vétérinaires est majoritairement due aux animaux de production, de par leur effectif mondial plus important et leur habitat principalement extérieur. Il a ainsi été montré que l'utilisation massive des lactones macrocycliques (notamment l'ivermectine) dans le traitement préventif du bétail est à l'origine de conséquences écologiques importantes par l'élimination d'arthropodes non-cibles tels que les bousiers et les abeilles, ainsi que par la contamination d'organismes aquatiques. (HealthForAnimals, 2023; Lima et al., 2024; Nieman et al., 2018)

c. Les pesticides employés sur des surfaces inertes ou directement sur les organismes nuisibles : les biocides

Les biocides regroupent des pesticides qui ne sont généralement employés ni sur des cultures végétales, ni sur des animaux. L'Union Européenne (UE) dénombre 22 types de produits biocides, classés en quatre groupes :

- le groupe des produits désinfectants : par exemple ceux employés sur le mobilier médical ou encore dans l'industrie agro-alimentaire³... ;

³ Le groupe des produits désinfectants comporte deux types de produits faisant exception à la catégorisation des biocides en « pesticides employés sur des surfaces inertes ou directement sur les organismes nuisibles » : les désinfectants destinés à l'hygiène humaine (désinfection de la peau) et ceux destinés à l'hygiène vétérinaire (savons désinfectants par exemple).

- le groupe des produits de protection : protection du bois contre les insectes xylophages, protection des peintures ou du cuir face aux altérations... ;
- le groupe des produits de lutte contre les nuisibles : rodenticides, molluscicides, insecticides et acaricides (notamment les bombes d'aérosols à usage domestique et les fumigations mises en place lors d'infestations massives), répulsifs et appâts ... ;
- le groupe des autres produits biocides, catégorie comportant deux types de produits à usage très spécifique : les produits antisalissures limitant l'adhérence d'organismes aux coques des bateaux, et les fluides utilisés pour l'embaumement et la taxidermie. (Ministères de l'aménagement du territoire et de la transition écologique, 2025)

La catégorie des biocides regroupe donc de très nombreux pesticides à usages professionnels ou domestiques, rendant l'évaluation de leur utilisation mondiale très complexe. Les biocides étant principalement destinés à un usage domestique au sein de bâtiments, leurs conséquences environnementales peuvent sembler négligeables par rapport à celles des pesticides à usage agricole qui sont généralement directement déversés dans l'environnement extérieur. Néanmoins, l'impact environnemental des biocides est probablement sous-estimé car difficilement évaluable. En 2019, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a publié les résultats de l'étude « Pesti'Home » réalisée en 2014, qui reste à ce jour l'unique étude évaluant les habitudes d'utilisation domestique de pesticides (principalement biocides) en France métropolitaine. Elle a notamment montré que les trois-quarts (75,1 %) des 1 500 ménages inclus dans l'étude ont utilisé au moins un produit pesticide au sens large au cours de l'année 2014. L'étude a également pu révéler le taux d'utilisation des biocides les plus courants : 39,6 % des ménages ont utilisé un biocide contre les insectes volants en 2014, 28 % contre les insectes rampants et 9,3 % contre les rongeurs. Les substances actives les plus utilisées sont des insecticides qui appartiennent en grande majorité à la famille des pyréthréinoïdes. Ces molécules sont également très communes dans les produits phytosanitaires et les médicaments antiparasitaires vétérinaires. Enfin, l'étude a montré que les conditions de stockage, d'emploi et d'élimination des pesticides à usage domestique sont peu connues du grand public, malgré la toxicité environnementale potentielle de ces produits. (Anses, 2019)

Pour limiter l'impact écologique des pesticides, de nombreuses réglementations internationales, européennes et nationales encadrent leur production, leur stockage et leur utilisation.

2. Impact écologique des pesticides et réglementation

a. Toxicité et devenir des pesticides dans l'environnement

Le mode d'action des pesticides est très rarement spécifique à l'espèce nuisible ciblée. Ce manque de spécificité induit alors une toxicité envers les organismes non-cibles, qui peut être limitée aux espèces proches des nuisibles ciblés ou alors étendue à de très nombreuses espèces, notamment pour les plus anciennes molécules. La toxicité environnementale des pesticides peut également concerner l'espèce humaine. Dès 1975, l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) met en place des critères de classification des pesticides en fonction des dangers qu'ils représentent pour les êtres humains. La classification d'une molécule s'effectue par son administration à des rats (ou à d'autres espèces de laboratoire) par voie orale ou cutanée puis par l'estimation de sa dose létale médiane (DL50), qui correspond à la dose provoquant la mort de 50% des animaux exposés. Ainsi, plus la DL50 d'un pesticide est faible, plus cette molécule est toxique pour l'espèce étudiée, et donc plus cette molécule est estimée dangereuse pour l'être humain. Une version de cette classification révisée en 2009 est présentée dans le **Tableau I**. (OMS, 2019; Yadav & Devi, 2017)

Tableau I : Classification de l'OMS des pesticides en fonction des dangers qu'ils présentent

Classe	Niveau de danger	DL50 pour le rat (mg/kg de poids corporel)	
		Voie orale	Voie cutanée
Ia	Extrêmement dangereux	< 5	< 50
Ib	Très dangereux	5 à 50	50 à 200
II	Modérément dangereux	50 à 2 000	200 à 2 000
III	Légèrement dangereux	> 2 000	
U	Peu susceptible de présenter un danger aigu	> 5 000	

Par exemple, si l'administration d'une dose de 4 mg/kg d'un pesticide par voie orale tue plus de la moitié des rats testés, il sera classé comme étant « extrêmement dangereux ».
(D'après OMS, 2019)

Selon le mode et la durée d'exposition, les pesticides peuvent causer des intoxications aiguës (pouvant aller de simples irritations et vomissements jusqu'au coma, voire le décès) ou des intoxications chroniques (cancers, maladies cardiovasculaires...). La toxicité chronique des pesticides utilisés dans un but alimentaire (agriculture, élevage) est par exemple prise en compte par l'établissement de limites maximales de résidus (LMR). La toxicité des pesticides est à l'origine de près de trois millions d'intoxications aiguës et de 150 000 décès par an, majoritairement dus à des ingestions volontaires. Les intoxications involontaires peuvent avoir lieu par ingestion d'aliments contaminés ainsi que par voie cutanée et par inhalation, notamment pour les agriculteurs qui sont les populations les plus exposées. Les modifications des pratiques agricoles et l'utilisation de pesticides moins dangereux pour les êtres humains (par exemple, les néonicotinoïdes) ont été à l'origine

d'une diminution de la survenue d'intoxications dans les pays industrialisés depuis une trentaine d'années. (Eddleston, 2024; Yadav & Devi, 2017)

La toxicité des pesticides concerne également les animaux. Par exemple, le mode d'action des insecticides est à l'origine d'une toxicité sur de nombreux organismes non-cibles, notamment les arthropodes. En effet, l'application de ces pesticides peut provoquer des effets létaux (mort) ou sublétaux (modifications comportementales) sur les espèces prédatrices des nuisibles ciblés, telles que les araignées ou les carabes, ainsi que sur des espèces bénéfiques et essentielles à la stabilité de l'écosystème, telles que les pollinisateurs ou les vers de terre. Même les molécules récentes telles que les néonicotinoïdes présentent une importante toxicité envers les arthropodes non-cibles. De plus, alors que ces molécules sont sélectivement plus toxiques pour les arthropodes que pour les vertébrés, l'intoxication des mammifères et oiseaux granivores est fréquente. Enfin, l'utilisation importante des néonicotinoïdes et des pesticides de manière générale est à l'origine d'une contamination des milieux aquatiques et de l'intoxication des organismes aquatiques. De façon moins évidente, d'autres catégories de pesticides telles que les herbicides, les fongicides ou encore les rodenticides peuvent également présenter une toxicité envers les animaux selon les modalités d'exposition aux substances. Finalement, l'exposition aiguë ou chronique des animaux à des pesticides est à l'origine d'effets létaux ou sublétaux, provoquant un déséquilibre majeur dans l'écosystème. (Baćmaga et al., 2024; Goulson, 2013; Mandal et al., 2025; Yadav & Devi, 2017)

Au-delà d'une atteinte à la santé publique et animale, les pesticides présentent également un danger pour la santé de l'environnement : lutter contre la toxicité des pesticides s'inscrit donc dans le concept « *One Health* » (« une seule santé » - humaine, animale et environnementale). Comme évoqué précédemment, Bernardes et al. (2015) estiment que près de 99 % des pesticides agricoles pulvérisés dans les champs n'atteignent pas leur cible. Les caractéristiques physico-chimiques des pesticides et les conditions environnementales définissent leur devenir. Les pesticides peuvent ainsi être transportés (par le vent et par les eaux de ruissellement), transférés (absorption par le sol ou par des organismes vivants non-cibles, évaporation dans l'atmosphère puis condensation lors de précipitations...) ou dégradés (par la lumière, par l'action de microorganismes ou encore par des réactions chimiques dans le sol) (**Figure 24**). La persistance des pesticides dans l'environnement dépend donc de leurs caractéristiques physico-chimiques, qui conditionnent leur transport, leur transfert et leur dégradation. (Gavrilescu, 2005; Tudi et al., 2021)

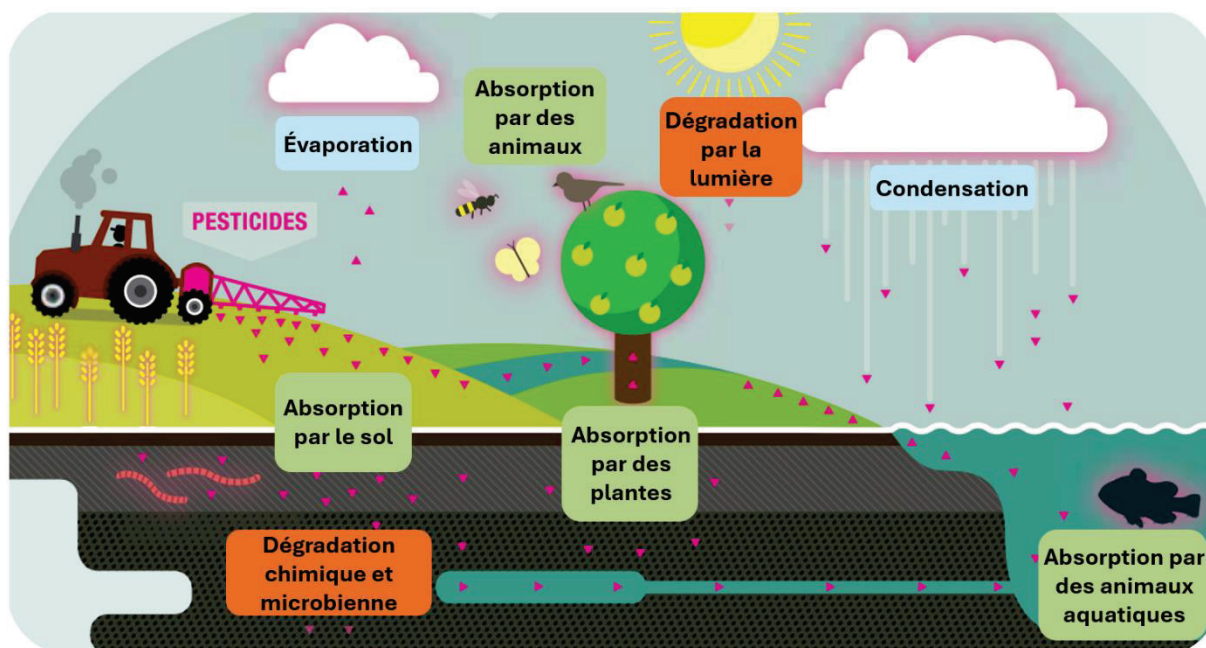


Figure 24 : Transfert et dégradation des pesticides dans l'environnement

Seuls les pesticides à usage agricole sont indiqués sur cette illustration. Les médicaments antiparasitaires vétérinaires et les biocides employés en extérieur suivent les mêmes mécanismes de transfert et de dégradation, mais à des échelles et importances réduites. (D'après Greenpeace, 2015)

Enfin, certains pesticides sont des substances persistantes, bioaccumulables et toxiques (PBT). Comme leur nom l'indique, les PBT présentent trois caractéristiques principales. Tout d'abord, ils sont capables de persister pendant des années dans l'environnement car leur dégradation est très lente. Ensuite, ils peuvent être absorbés et concentrés dans les tissus des êtres vivants au cours du temps. Cette bioaccumulation s'observe chez tous les organismes vivant dans un environnement pollué et est particulièrement prononcée chez les organismes filtreurs tels que les coquillages bivalves et les champignons, qui présentent des concentrations en PBT bien plus élevées que celles de leur milieu de vie. De plus, en consommant des organismes ayant concentré des substances PBT, les espèces prédatrices (dont font partie les araignées) amplifient leur propre bioaccumulation. Par ce phénomène de bioamplification, la bioaccumulation est donc maximale chez les espèces prédatrices des derniers stades du réseau trophique (« en haut de la chaîne alimentaire ») (**Figure 25**). Enfin, les PBT sont des molécules particulièrement toxiques pour les organismes vivants et l'environnement. Parmi les PBT, on retrouve principalement des pesticides, des produits issus de l'industrie chimique (biphényles polychlorés...) ou émis involontairement lors de combustions industrielles (dioxines, furanes...), des médicaments et des éléments-traces métalliques (ETM, ou « métaux lourds »). De par leurs caractéristiques, les PBT sont des polluants majeurs qui menacent les écosystèmes. (Commission de coopération environnementale (CCE), 2008)

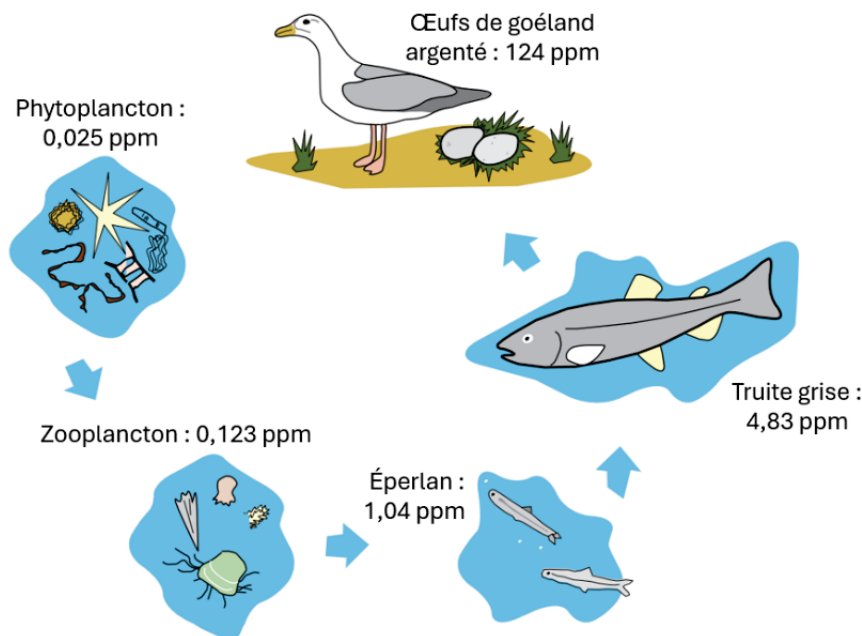


Figure 25 : Bioaccumulation de substances persistantes, bioaccumulables et toxiques (PBT) par bioamplification dans le réseau trophique

Dans cet exemple de réseau trophique de l'écosystème aquatique des Grands Lacs d'Amérique du Nord, la concentration (en partie par million (ppm)) en polychlorobiphényles (PCB ; substances PBT anciennement massivement utilisées comme isolants électriques) augmente à chaque échelon du réseau trophique par bioamplification. (D'après CCE, 2008)

La toxicité des pesticides et des PBT envers la santé humaine, animale et environnementale a motivé la mise en place de réglementations internationales et nationales strictes.

b. Réglementation des pesticides et autorisation de mise sur le marché

La diversité des pesticides et leurs conséquences écologiques encore sous-évaluées impliquent la mise en place de réglementations complexes, régulièrement modifiées et mises à jour. Ce travail n'abordera que la réglementation et les principales conventions encadrant l'autorisation de mise sur le marché (AMM) des pesticides (résumées sur la **Figure 26**), ainsi que les interdictions relatives aux substances PBT.

i. AMM des produits phytosanitaires

La mise sur le marché et l'utilisation des produits phytosanitaires sont encadrées à l'échelle européenne par le règlement (CE) n°1107/2009 et à l'échelle française par l'article L253 du code rural et de la pêche maritime (Livre II, Titre V, Chapitre III). Tout d'abord, les substances actives sont évaluées et approuvées (ou non) à l'échelle européenne par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA). L'évaluation de la substance active consiste en une détermination des dangers liés à ses propriétés physico-chimiques et en une évaluation des risques potentiels causés par son utilisation : toxicité envers l'Homme, la faune et la flore ;

devenir et impact environnemental... Les autres substances entrant dans la composition d'un produit phytosanitaire (nommées adjuvants ou coformulants) doivent également être autorisées à l'échelle européenne. L'évaluation des adjuvants est néanmoins bien plus sommaire que celle des substances actives et leur toxicité potentielle est encore peu étudiée à l'heure actuelle. (Anses, 2023; Article L235 du code rural et de la pêche maritime concernant la mise sur le marché et l'utilisation des produits phytopharmaceutiques, actualisé en 2025; Règlement (CE) n°1107/2009 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques, 2009)

Une fois une substance active approuvée par l'EFSA à l'échelle européenne, elle peut faire partie de la composition de produits phytosanitaires dans les états membres de l'UE. A l'image des médicaments humains et vétérinaires, tout produit phytosanitaire nécessite une AMM afin de pouvoir être commercialisé et utilisé sur le territoire français. Une AMM n'est valable que pour une présentation spécifique (poudre, liquide...) et pour des usages précis, définis par le type de culture concerné, la fonction du produit et le nuisible ciblé. En Europe, les produits sont évalués par zone géographique et non par pays. Parmi les trois zones définies (Nord, Centre et Sud), la France appartient à la zone Sud : toute analyse produite dans un des autres pays de la zone Sud s'applique également en France. Depuis 2015, l'Anses est l'organisme chargé d'examiner les dossiers d'AMM et de délivrer les AMM des produits phytosanitaires en France ; cette mission relevait auparavant de la responsabilité de la Direction générale de l'alimentation (ministère de l'Agriculture). Bien que les critères d'évaluation des produits phytosanitaires soient uniformisés à l'échelle européenne (règlement (UE) N° 546/2011) et que les analyses s'appliquent par zone géographique, les AMM sont spécifiques à chaque pays car chaque état membre peut adopter des mesures réglementaires nationales supplémentaires : un produit peut ainsi être autorisé dans un pays mais interdit chez ses voisins. Pour chaque produit phytosanitaire, l'Anses évalue son efficacité et les risques envisageables (pour les humains, la faune et la flore) dans le cadre des usages définis par les industriels, puis établit les LMR acceptables dans les produits alimentaires traités. A l'issue de cette évaluation, l'Anses autorise ou refuse la commercialisation du produit. Ainsi, même si la substance active et les adjuvants constituant un produit phytosanitaire ont été approuvés à l'échelle européenne, l'AMM du produit peut être refusée par l'Anses. (Anses, 2025; Règlement (UE) n°546/2011 concernant les principes uniformes d'évaluation et d'autorisation des produits phytopharmaceutiques, 2011)

Le statut des substances actives et des AMM n'est jamais fixé. Avec l'avancée des recherches toxicologiques, une substance active auparavant approuvée au niveau européen peut être interdite. Dans ce cas, tout produit contenant cette substance est retiré du marché et les AMM sont annulées. Une AMM peut également prendre fin si des éléments nouveaux contre-indiquent l'utilisation du produit phytosanitaire dans les usages définis par l'AMM. Enfin, à l'inverse, il est possible qu'une substance active interdite ou qu'une AMM refusée soit réévaluée et finalement approuvée. (Anses, 2025)

ii. AMM des médicaments antiparasitaires vétérinaires

En France, les AMM des médicaments vétérinaires, dont font partie les antiparasitaires vétérinaires, sont délivrées à l'échelle nationale par l'Agence nationale du médicament vétérinaire (ANMV) au sein de l'Anses, ou à l'échelle européenne par l'Agence européenne des médicaments (EMA) via une procédure centralisée accordant l'AMM à tous les Etats membres de l'UE. Tout comme celle des produits phytosanitaires, l'évaluation des médicaments vétérinaires par l'ANMV repose sur la détermination de l'efficacité du produit et de ses potentiels effets indésirables sur l'espèce traitée, ainsi que sur les humains et sur l'environnement dans des conditions normales d'emploi. Plus précisément, le dossier d'AMM d'un médicament vétérinaire se compose de quatre parties rédigées par le producteur et examinées par l'ANMV :

- la partie I résume le dossier en comportant notamment le résumé des caractéristiques du produit (RCP) : nom du médicament, composition, galénique, indications... ;
- la partie II montre la qualité pharmaceutique du médicament en indiquant précisément la méthode de préparation et les différents contrôles réalisés ;
- la partie III s'intéresse à la sécurité du médicament en prouvant l'innocuité du médicament pour les espèces cibles, ainsi que l'absence de risques pour les humains et l'environnement dans les conditions normales d'emploi via l'établissement des LMR. Ces deux dernières exigences (résidus et écotoxicité) ne concernent que la filière des animaux de rente, au vu de la consommation humaine de produits issus de ces animaux et de leur milieu de vie généralement extérieur ;
- la partie IV expose l'efficacité du médicament via les différents essais pré-cliniques réalisés en laboratoire.

L'évaluation du bon rapport bénéfice/risque par l'ANMV suite à l'évaluation du dossier du médicament motive alors la délivrance de l'AMM. Enfin, de même que pour les produits phytosanitaires, les AMM des médicaments vétérinaires ne sont jamais permanentes. En effet, l'ANMV est également responsable de la pharmacovigilance des médicaments vétérinaires : ainsi, en cas de remontée par les praticiens d'effets indésirables sur les animaux, sur les humains ou sur l'environnement, l'ANMV peut procéder au retrait de l'AMM des médicaments vétérinaires concernés. (Anses, 2022)

iii. AMM des produits biocides

Conformément au règlement (UE) n°528/2012, la délivrance des AMM des produits biocides est divisée en deux étapes analogues à celles régissant la délivrance des AMM des produits phytosanitaires : approbation des substances actives à l'échelle européenne puis approbation des produits biocides à l'échelle nationale. Tout d'abord, les substances actives biocides sont examinées et approuvées (ou non) à l'échelle

européenne par l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA). Une fois approuvée, une substance active peut être employée dans un produit biocide dans tous les Etats membres de l'UE. Depuis 2016, l'organisme en charge de la délivrance des AMM des produits biocides en France est l'Anses, succédant au ministère en charge de l'Environnement. Tout comme pour les autres types de pesticides, l'Anses examine le dossier d'AMM du producteur et approuve l'AMM selon l'efficacité du produit et l'absence d'effets indésirables sur les humains et l'environnement dans des conditions normales d'utilisation. De nouveau, l'AMM d'un produit biocide peut être retirée en cas d'interdiction de sa substance active ou en cas de remontée d'effets indésirables suite à son autorisation. (ECHA, 2024)

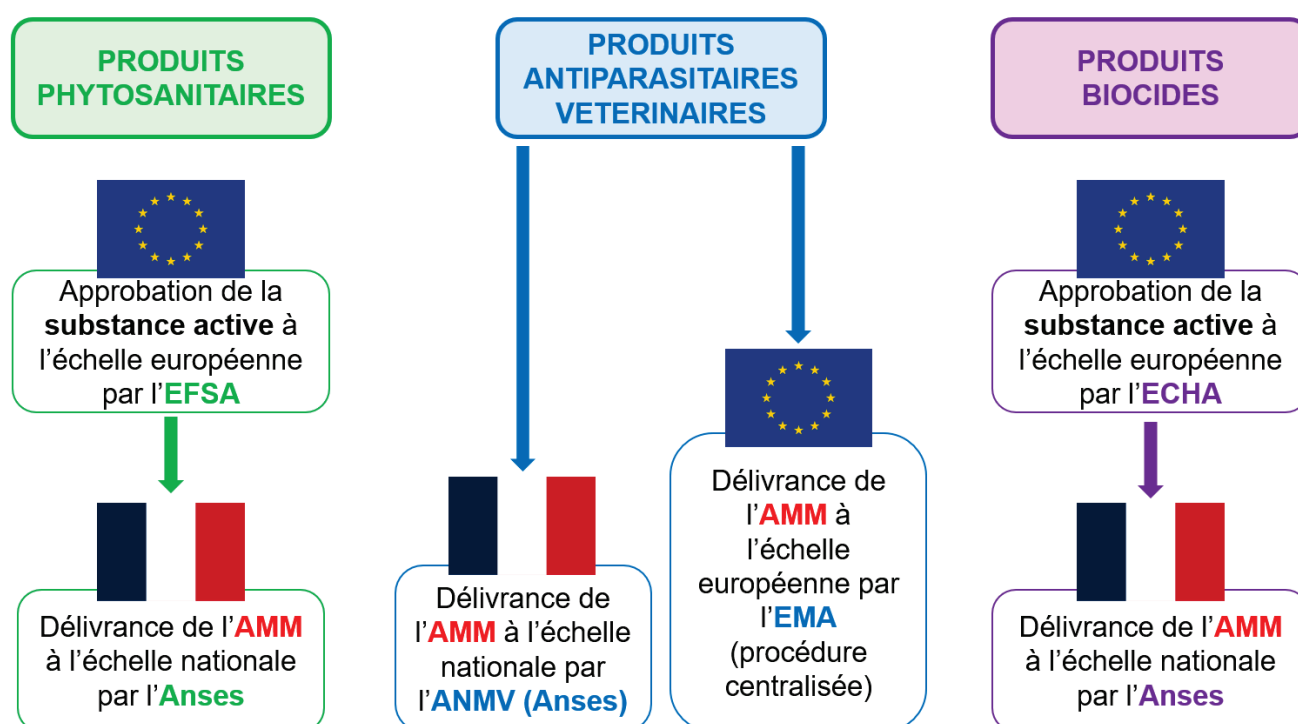


Figure 26 : Organismes intervenant dans la délivrance des autorisations de mise sur le marché (AMM) des pesticides à l'échelle européenne et à l'échelle nationale

L'approbation des substances actives à l'échelle européenne est une étape essentielle à la délivrance des AMM des produits phytosanitaires et biocides à l'échelle nationale.

Généralement délivrées par l'Anses, les AMM des médicaments vétérinaires peuvent également être délivrées à l'échelle européenne, notamment pour toute substance active nouvelle ainsi que pour les médicaments biologiques tels que les vaccins.

Les abréviations des organismes, présentées dans la liste des abréviations, sont rappelées ci-après : ANMV, Agence nationale du médicament vétérinaire ; Anses, Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail ; ECHA, Agence européenne des produits chimiques ; EFSA, Autorité européenne de sécurité des aliments ; EMA, Agence européenne des médicaments.

(Source : DENIS Clément)

iv. Réglementations internationales sur la gestion des pesticides et sur l'interdiction des substances les plus problématiques

Au-delà de la législation concernant les AMM des pesticides, il existe des codes et conventions internationales encadrant la production, la gestion et l'élimination des pesticides, ainsi qu'interdisant les molécules les plus problématiques.

Le Code de conduite international sur la gestion des pesticides, approuvé par la FAO depuis 1985, est un cadre volontaire proposant des mesures de gestion des pesticides sur tout leur cycle de vie, de leur production à leur élimination. Il est destiné à tout organisme public ou privé jouant un rôle dans le cycle de vie des pesticides. (FAO & OMS, 2014)

La Convention de Rotterdam, ouverte en 1998 et actuellement signée par 72 pays, est un cadre juridiquement contraignant (c'est-à-dire un ensemble de règles que les pays signataires doivent impérativement suivre) visant à réduire les risques causés par le commerce international de substances chimiques dangereuses. Parmi la liste des produits chimiques soumis à la convention, qui sont alors strictement réglementés, 70 % sont des pesticides. On y retrouve principalement des insecticides, notamment appartenant aux familles des organochlorés, des organophosphorés et des carbamates. Pour chaque substance inscrite sur la liste de la convention, chaque pays signataire indique celles dont il accepte l'importation et la gestion. En parallèle, chaque exportation nécessite le consentement du pays importateur via une procédure administrative codifiée. La convention de Rotterdam permet donc une meilleure organisation internationale de la gestion des produits chimiques les plus préoccupants. (Secrétariat de la convention de Rotterdam (SRC) & FAO, 2023)

La Convention de Stockholm, adoptée en 2001 et actuellement signée par 152 pays, est un cadre juridiquement contraignant visant à protéger les santés humaines, animales et environnementales des polluants organiques persistants (POP). On désigne par POP l'ensemble des PBT organiques présentant un important potentiel de propagation à longue distance dans l'environnement. Bien que la majorité des PBT soient des POP, les deux concepts ne sont pas équivalents : par exemple, les éléments-traces métalliques (ETM) sont des PBT non organiques et ne sont donc pas des POP. On retrouve dans la convention de Stockholm trois types de POP (les pesticides, les produits issus de l'industrie chimique qui ne sont pas des pesticides et les polluants produits involontairement lors de combustions industrielles), classés dans trois annexes :

- l'annexe A regroupe les substances à impérativement éliminer et dont la production doit être stoppée. On y retrouve 14 pesticides, 13 produits industriels et 4 POP possédant des usages mixtes en tant que pesticides et dans l'industrie ;
- l'annexe B regroupe les substances dont la production et l'utilisation doivent être restreintes à des usages précis. On y retrouve un pesticide et un POP mixte ;

- l'annexe C regroupe les substances POP dont la production non intentionnelle doit être minimisée. Cette annexe regroupe sept polluants produits involontairement. Certains POP de l'annexe C sont également retrouvés dans l'annexe A car leur production intentionnelle avait auparavant une utilité.

Initialement limitée à 12 polluants dont neuf pesticides, la convention de Stockholm concerne actuellement 40 POP dont 19 peuvent être utilisés en tant que pesticides. La quasi-totalité de ces pesticides sont des insecticides appartenant à la famille des organochlorés, qui est une des plus anciennes familles d'insecticides synthétiques. Ces insecticides utilisés massivement à partir des années 1940 présentent de telles capacités de persistance, bioaccumulation, toxicité et mobilité qu'ils posent encore des problèmes environnementaux plusieurs décennies après leur interdiction. Par exemple, le dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT), pourtant interdit dès les années 1970 dans plusieurs pays occidentaux, est encore aujourd'hui retrouvé à l'état de traces dans le sol de tous les continents et même en Arctique ! Néanmoins, le DDT est le seul pesticide organochloré appartenant à l'annexe B (tous les autres appartiennent à l'annexe A) car son utilisation reste nécessaire dans la lutte antivectorielle du paludisme dans les pays en développement. (Secrétariat de la convention de Stockholm (SSC), 2023, 2024)

v. Problématiques récentes et futures concernant la réglementation des pesticides en France

Les problématiques environnementales liées à l'utilisation des pesticides et leur toxicité font que ces substances sont au cœur de nombreuses discussions et débats amenant à l'adoption et à la modification de nombreuses lois françaises.

Par exemple, la loi Labbé, adoptée en 2014 et mise en œuvre à partir de 2017, interdisait initialement uniquement l'utilisation de produits phytosanitaires (sauf ceux jugés à faibles risques ou utilisés en agriculture biologique) dans les espaces verts ouverts au public. Cette interdiction s'étend aux particuliers en 2019, qui ne peuvent plus acheter, détenir ou utiliser ces mêmes produits phytosanitaires pour leur jardin ou leur habitation. Enfin, en 2022, cette interdiction s'étend à l'ensemble des lieux fréquentés par le public, indépendamment de leur activité (loisir, hébergement, service...). Cette loi et les arrêtés la modifiant font partie du plan Ecophyto. Cette stratégie mise en place par le gouvernement français à partir de 2008 vise à réduire l'utilisation et l'impact des pesticides au sens large sur l'environnement et la santé humaine. Bien que l'objectif principal - réduire de 50 % l'utilisation des pesticides en France – soit régulièrement repoussé avec une échéance initialement prévue en 2018 (Ecophyto 2018), puis en 2025 (Ecophyto 2 et 2+) et actuellement en 2030 (Ecophyto 2030), le plan Ecophyto a permis de nombreuses améliorations concernant l'utilisation raisonnée des pesticides, comme avec la loi Labbé. Néanmoins, la stratégie Ecophyto est régulièrement au cœur du débat public, de par la difficulté de concilier la préservation du « *One Health* » en diminuant l'utilisation des pesticides, et le besoin

de soutenir les performances économiques des exploitations agricoles. Par exemple, suite au mouvement des « agriculteurs en colère » débuté en janvier 2024, le plan Ecophyto est mis en pause en février 2024 puis rétabli sous une version modifiée en mai 2024 afin de davantage soutenir les exploitations agricoles. (Ecophyto PRO, 2025; Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2024)

Dans le cadre du plan Ecophyto, le gouvernement français peut être amené à interdire des substances actives pourtant autorisées à l'échelle européenne. Par exemple en 2018, cinq insecticides de la famille des néonicotinoïdes, dont l'acétamipride, ont été interdits (sauf dérogations particulières) en France. L'acétamipride étant approuvé jusqu'en 2033 en UE, certaines filières françaises relativement dépendantes de ce pesticide telles que les filières betterave et noisette se sont retrouvées pénalisées par rapport à celles d'autres pays européens. En réponse, une proposition de loi (dite loi « Duplomb ») permettant entre autres la réautorisation temporaire de l'acétamipride en France est proposée et adoptée le 8 juillet 2025 par l'Assemblée nationale. Suite à cette décision controversée, une pétition d'initiative citoyenne recueille plus de deux millions de signatures en un mois. Cette mobilisation citoyenne exceptionnelle motive une réévaluation de la loi par le Conseil constitutionnel, qui prend la décision de censurer l'article concernant la réintroduction de l'acétamipride lors de la promulgation de la loi le 11 août 2025. Cet exemple très récent montre l'importance et la pertinence de la réglementation des pesticides dans le contexte actuel de pollution environnementale par ces substances toxiques et persistantes. (Direction de l'information légale et administrative, 2025)

3. Principaux pesticides ayant fait l'objet d'études en lien avec les araignées aranéomorphes

Depuis une quarantaine d'années, de nombreux substances actives et adjuvants constituant des pesticides au sens large ont été testés sur les araignées aranéomorphes. Face à cette diversité de substances, cette partie propose une présentation des principales molécules étudiées (qui sont par ailleurs généralement les molécules les plus utilisées ou les plus retrouvées dans l'environnement) afin d'améliorer la compréhension des parties suivantes.

a. Pesticides ciblant des arthropodes : insecticides et acaricides

Tout comme les insectes et acariens ravageant les cultures ou parasitant les animaux domestiques, les araignées sont des arthropodes. Ainsi, il n'est pas étonnant que les insecticides et acaricides soient les principaux types de pesticides testés dans les études toxicologiques ciblant les araignées. (Pekár, 2012)

i. Insecticides et acaricides dont le mécanisme d'action est en lien avec l'acétylcholine

Le mécanisme d'action de nombreux insecticides et acaricides est en lien avec l'acétylcholine, qui est un neurotransmetteur essentiel des systèmes nerveux (central, périphérique et autonome) et musculaires de nombreux animaux (dont les arthropodes et les mammifères) via ses récepteurs nicotiniques et muscariniques. Ces insecticides et acaricides agissent principalement en amplifiant les effets nicotiniques de l'acétylcholine, qui permettent notamment en situation physiologique la transmission d'un message nerveux excitateur au niveau des synapses neuronales dans le système nerveux central puis au niveau neuromusculaire, provoquant la contraction des muscles. (Sam & Bordoni, 2023)

En situation physiologique (**Figure 27**), l'acétylcholine est un neurotransmetteur permettant la conversion d'un message électrique (potentiel d'action) en un message chimique (concentration en acétylcholine) au niveau de l'espace synaptique séparant deux neurones. Tout d'abord, l'arrivée d'un potentiel d'action au niveau du neurone pré-synaptique provoque la libération de vésicules contenant des milliers de molécules d'acétylcholine dans l'espace synaptique. Les molécules d'acétylcholine diffusent ensuite dans l'espace synaptique vers les récepteurs nicotiniques situés sur la membrane du neurone post-synaptique. La fixation des molécules d'acétylcholine sur les récepteurs nicotiniques provoque une dépolarisation membranaire dans le neurone post-synaptique, permettant le rétablissement du message électrique et donc la progression du message nerveux. Les molécules d'acétylcholine se détachent ensuite des récepteurs nicotiniques et sont rapidement dégradées par l'action d'enzymes spécifiques, les acétylcholinestérases, permettant l'arrêt de la transmission du message et donc, par exemple, l'arrêt de la contraction musculaire. (Sam & Bordoni, 2023)

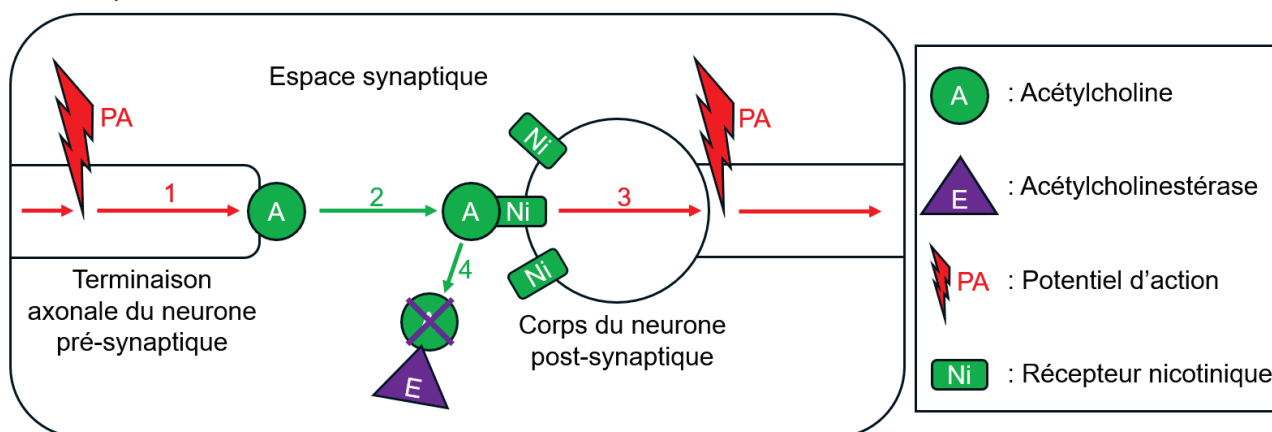


Figure 27 : Représentation schématique simplifiée du rôle physiologique de l'acétylcholine dans la communication nerveuse au niveau d'une synapse

L'arrivée d'un potentiel d'action (1) provoque la libération de molécules d'acétylcholine (2) dans l'espace synaptique, qui vont se fixer sur les récepteurs nicotiniques, permettant la transmission du potentiel d'action dans le neurone post-synaptique (3). Les molécules d'acétylcholine se détachent et sont dégradées par les acétylcholinestérases (4), mettant fin à la communication nerveuse. (Source : DENIS Clément)

- Les néonicotinoïdes

Les néonicotinoïdes sont une famille de molécules présentant une affinité pour les récepteurs nicotiniques post-synaptiques des insectes. En tant qu'agonistes compétitifs de ces récepteurs, ils se fixent à la place de l'acétylcholine et provoquent une dépolarisation membranaire dans le neurone post-synaptique. Néanmoins, contrairement à l'acétylcholine, les néonicotinoïdes ne sont pas sensibles à l'action des acétylcholinestérases et ne sont donc pas dégradés. Ils peuvent donc continuellement se fixer aux récepteurs nicotiniques, provoquant une surstimulation neuronale (**Figure 28**) : on observe une hyperexcitation, des convulsions et une paralysie amenant à la mort de l'insecte intoxiqué. Les néonicotinoïdes présentent une affinité 1 000 fois plus marquée pour les récepteurs nicotiniques des insectes que pour ceux des mammifères : cette sélectivité importante est à l'origine d'une toxicité faible chez les mammifères, dont l'espèce humaine. (Ihara & Matsuda, 2018)

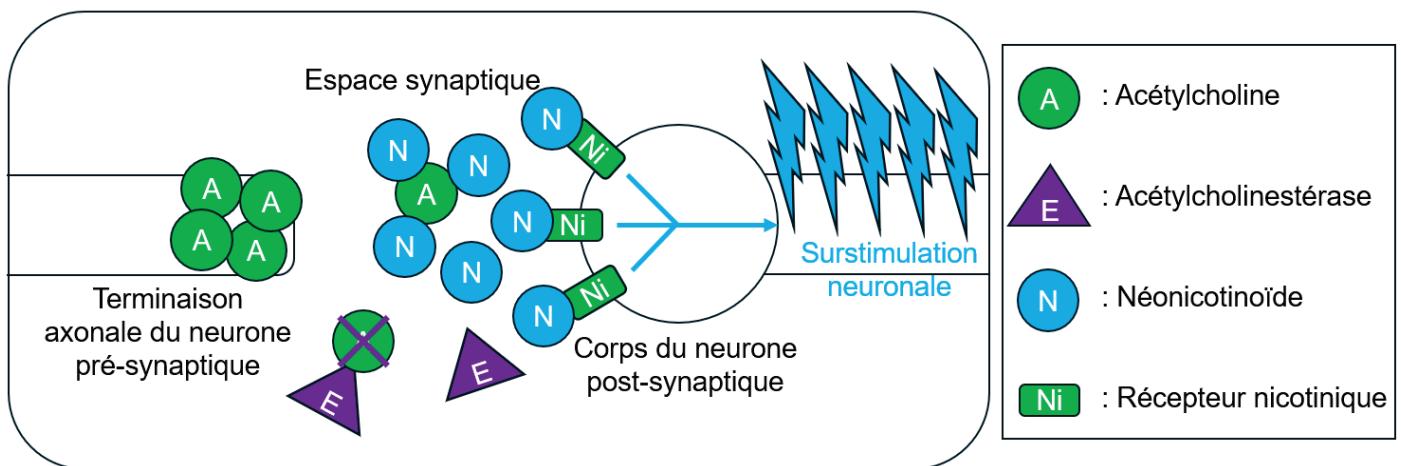


Figure 28 : Représentation schématique simplifiée du mécanisme d'action des néonicotinoïdes

Les néonicotinoïdes sont des agonistes compétitifs des récepteurs nicotiniques à l'acétylcholine et ne peuvent pas être dégradés par les acétylcholinestérases. Ils se fixent sur les récepteurs à la place des molécules d'acétylcholine sans être dégradés, provoquant une dépolarisation répétée dans le neurone post-synaptique, et donc une surstimulation neuronale à l'origine de convulsions et de la mort des arthropodes par paralysie. (Source : DENIS Clément)

Commercialisés depuis le début des années 1990, les néonicotinoïdes sont rapidement devenus les insecticides les plus utilisés dans l'agriculture grâce à leur efficacité et leur relative sécurité d'utilisation. Ainsi, jusqu'à son interdiction dans l'UE en 2018, l'imidaclopride était l'insecticide le plus utilisé au monde. La même année, les néonicotinoïdes représentaient environ 30 % du marché mondial d'insecticides. (Ihara & Matsuda, 2018)

Depuis les années 2010, de nombreuses études ont mis en évidence les conséquences écologiques de l'utilisation des néonicotinoïdes. L'utilisation massive de ces molécules et leurs importantes capacités de persistance et de transfert dans le sol et le milieu aquatique ont été à l'origine d'une dissémination mondiale massive. De

plus, la présence de résidus dans le pollen et le nectar des fleurs expose particulièrement les pollinisateurs aux néonicotinoïdes. Mitchell et al. (2017) ont ainsi montré que sur 198 échantillons de miel récoltés tout autour du globe, 75 % contenaient au moins un des cinq principaux néonicotinoïdes utilisés en agriculture. Le déclin des populations d'abeilles sur les dernières décennies pourrait ainsi être en partie causé par l'utilisation massive de néonicotinoïdes. Bien que davantage marquée envers les arthropodes, la toxicité des néonicotinoïdes envers les organismes non-cibles a aussi été observée sur des organismes aquatiques, ainsi que sur des mammifères et oiseaux granivores ayant subi une exposition importante. L'ensemble de ces conséquences écologiques a été à l'origine de l'interdiction totale de l'utilisation agricole des néonicotinoïdes dans l'UE en 2018. (Goulson, 2013)

Actuellement, l'usage agricole des néonicotinoïdes est totalement interdit en France, mais quelques dérogations spécifiques existent dans les autres pays membres de l'UE (notamment l'acétamipride, autorisé jusqu'en 2033). Malgré leur impact environnemental, les néonicotinoïdes sont encore autorisés et utilisés dans de nombreux pays, dont les États-Unis. En France, l'interdiction des néonicotinoïdes se limite aux produits phytosanitaires, ainsi qu'aux produits biocides employés en extérieur. On peut ainsi retrouver des néonicotinoïdes dans des médicaments antiparasitaires vétérinaires destinés aux animaux de compagnie (avec trois molécules sur le marché en 2025 : imidaclopride, nitenpyram et dinotéfurane) ou dans des produits biocides à usage professionnel (par exemple, il existe en 2025 une trentaine de produits à base d'imidaclopride) car ces types de pesticides exposent peu les organismes non-cibles aux substances actives, contrairement aux produits phytosanitaires. (ANMV, 2025; Direction de l'information légale et administrative, 2025; ECHA, 2025)

- Organophosphorés et carbamates inhibiteurs des acétylcholinestérases

Les organophosphorés (OP) et les carbamates sont des familles de molécules insecticides et acaricides structurellement proches et présentant des mécanismes d'action similaires. Ils diffèrent dans leur origine : alors que les OP dérivent de l'acide phosphorique, les carbamates dérivent de l'acide carbamique. En inhibant les acétylcholinestérases, les OP et les carbamates sont à l'origine d'une accumulation de molécules d'acétylcholine dans l'espace synaptique, qui peuvent alors continuellement se fixer sur les récepteurs nicotiniques post-synaptiques, provoquant une surstimulation neuronale (**Figure 29**). Les signes cliniques de l'intoxication des insectes et acariens sont donc similaires à ceux observés lors d'intoxications aux néonicotinoïdes : hyperexcitation, convulsions, paralysie et mort. Historiquement, les principales molécules OP sont le chlorpyrifos-éthyl et le malathion, tandis que le carbaryl est l'un des principaux carbamates. (Richardson et al., 2019; Yadav & Devi, 2017)

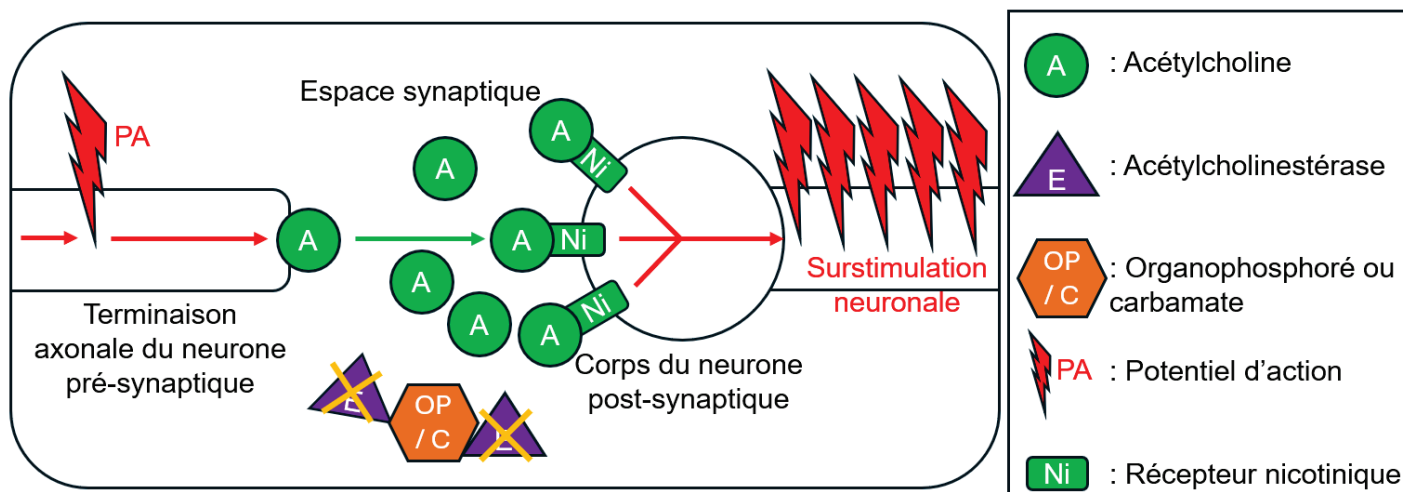


Figure 29 : Représentation schématique simplifiée du mécanisme d'action des organophosphorés et des carbamates

En tant qu'inhibiteurs des acétylcholinestérases, les organophosphorés et les carbamates provoquent une accumulation de molécules d'acétylcholine dans l'espace synaptique, à l'origine d'une surstimulation neuronale entraînant la mort des arthropodes nuisibles par paralysie. (Source : DENIS Clément)

Développés depuis les années 1930, les OP et carbamates ont principalement été utilisés à partir des années 1970 en remplacement des organochlorés car à l'inverse de ces derniers, leur rémanence faible est à l'origine d'une pollution environnementale minime. Néanmoins, ces molécules (notamment les OP) présentent une faible sélectivité et peuvent inhiber les acétylcholinestérases des mammifères et oiseaux lors d'expositions à des doses importantes, provoquant de graves intoxications aiguës pouvant mener au décès. La toxicité aiguë importante des OP et carbamates explique leur délaissement progressif au profit d'insecticides plus sûrs d'utilisation tels que les néonicotinoïdes et les pyréthri-noïdes. Par ailleurs, certains OP et carbamates sont soumis à la convention de Rotterdam. (Richardson et al., 2019; SRC & FAO, 2023; Yadav & Devi, 2017)

Contrairement aux néonicotinoïdes, l'utilisation de la plupart des OP et carbamates dans tous types de pesticides reste autorisée, mais il existe des réglementations interdisant des molécules spécifiques. Par exemple, le chlorpyrifos-méthyl est interdit dans tous les Etats membres de l'UE depuis 2020 par le règlement (UE) 2020/17. Les pesticides contenant des OP et carbamates sont néanmoins peu utilisés de nos jours en raison de leur toxicité importante. (Règlement d'exécution (UE) 2020/17 portant sur le non-renouvellement de l'approbation de la substance active «chlorpyrifos-méthyl», 2020)

ii. Insecticides et acaricides perturbant le fonctionnement des canaux sodiques voltage-dépendants

Les canaux sodiques voltage-dépendants (NaV) sont des structures formant des pores dans la membrane des neurones et permettant l'initiation et la propagation des potentiels d'action (inversion temporaire du potentiel transmembranaire) le long de leur axone. Au repos, le potentiel transmembranaire le long de l'axone d'un neurone est de -70 millivolts (mV) et les canaux NaV sont fermés. Lorsqu'une dépolarisation issue des terminaisons axonales d'un neurone voisin fait suffisamment augmenter le potentiel transmembranaire (au-dessus de -55 mV), les canaux NaV à la base de l'axone s'ouvrent, provoquant l'entrée d'ions sodium amplifiant la dépolarisation locale de l'axone : c'est l'initiation du potentiel d'action. Cette dépolarisation va à son tour permettre l'ouverture de canaux NaV voisins, permettant la propagation du potentiel d'action. Quelques millisecondes après leur ouverture, les canaux NaV se ferment, participant à la repolarisation membranaire. S'ensuit une courte période réfractaire au cours de laquelle les canaux NaV sont inactivés (ils ne peuvent pas s'ouvrir suite à la dépolarisation des canaux NaV suivants), imposant la propagation à sens unique du potentiel d'action, vers la terminaison axonale. Suite à cela, les canaux NaV se réactivent et restent fermés en attente de l'arrivée d'un prochain potentiel d'action. Les canaux NaV (ainsi que d'autres canaux ioniques voltage-dépendants tels que les canaux potassiques et calciques) jouent donc un rôle fondamental dans l'initiation, la transmission et l'arrêt des messages électriques dans le système nerveux. Ainsi, les canaux NaV sont les cibles de nombreux insecticides et acaricides, tels que les pyréthrinoïdes et les organochlorés (**Figure 30**). (Dong et al., 2014)

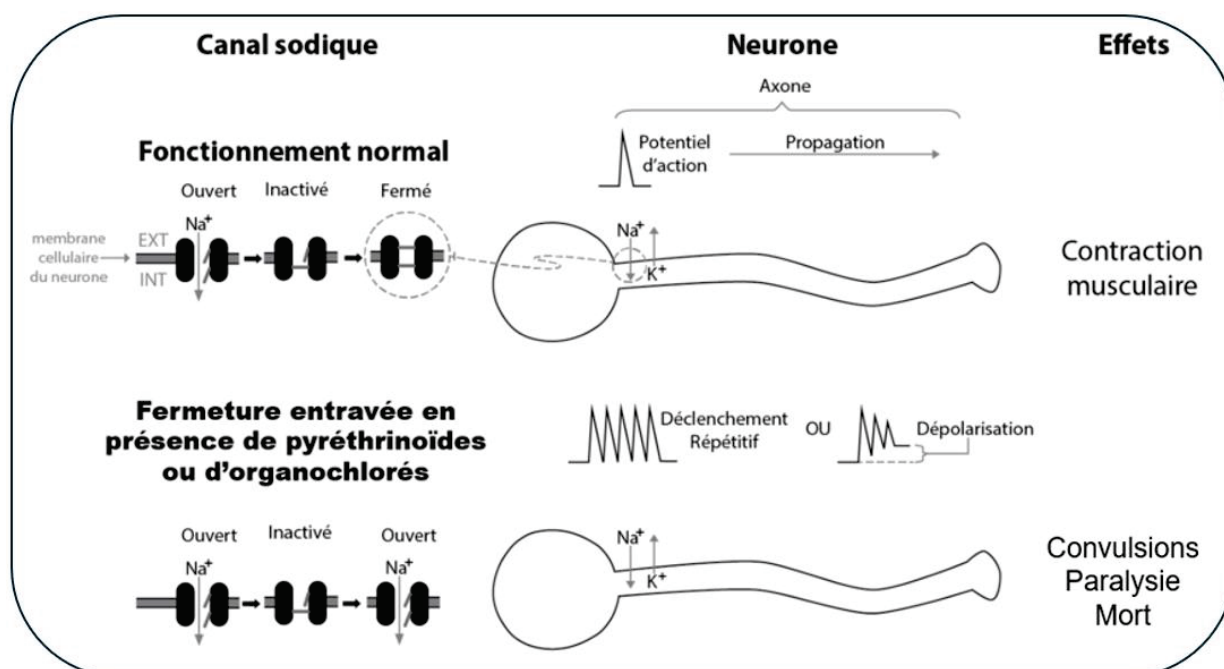


Figure 30 : Mécanisme d'action des pyréthrinoïdes et organochlorés

En perturbant le fonctionnement normal des canaux NaV, les pyréthrinoïdes et organochlorés provoquent des convulsions et la mort par paralysie des arthropodes nuisibles. (D'après Hénault-Ethier, 2016)

- Les pyréthrinaïdes

Les pyréthrinaïdes sont des molécules synthétiques dérivant des pyréthrines naturelles. Les plus récentes molécules pyréthrinaïdes, dites de type II, se distinguent de celles de type I par la présence d'un groupement nitrile dans leur structure chimique. Dans les deux cas, les pyréthrinaïdes exercent leurs actions insecticides et acaricides en empêchant la fermeture des canaux NaV. Alors que les pyréthrinaïdes de type I (principalement représentés par la perméthrine) provoquent une dépolarisation axonale répétée, ceux de type II (cyperméthrine, deltaméthrine...) sont à l'origine d'une dépolarisation prolongée, provoquant dans les deux cas des convulsions et la mort des nuisibles par paralysie (**Figure 30**). (Dong et al., 2014; Richardson et al., 2019)

Commercialisés depuis les années 1970, les pyréthrinaïdes sont très utilisés (ils représentent actuellement un tiers de l'utilisation mondiale d'insecticides) car ils présentent plusieurs qualités : leur action est très rapide et efficace, ils sont facilement dégradés dans l'environnement sous l'action de la lumière et ils présentent une relative innocuité envers les mammifères. Cette toxicité spécifique s'explique par la sensibilité bien plus importante des canaux NaV des insectes aux pyréthrinaïdes par rapport à ceux des mammifères, ainsi que par l'inactivation rapide des molécules pyréthrinaïdes permise par le foie des mammifères. On notera tout de même que la perméthrine est particulièrement toxique chez les chats à cause du déficit en glucuronoconjugaison propre à cette espèce limitant l'inactivation de ce pyréthrinaïde au niveau hépatique. L'impact environnemental des pyréthrinaïdes est remis en question depuis une dizaine d'années. En effet, bien que la toxicité de ces molécules soit faible pour les mammifères et les oiseaux, les pyréthrinaïdes sont extrêmement toxiques pour les invertébrés non-cibles (dont les araignées) et pour les organismes aquatiques (poissons, crustacées, amphibiens...) car ces animaux hétéothermes (« à sang froid ») présentent un métabolisme et une détoxification hépatique lents. Ainsi, malgré la dégradation rapide de ces pesticides dans l'environnement, les faibles quantités de résidus de pyréthrinaïdes contaminant les milieux aquatiques suffisent à intoxiquer les organismes, altérant leur comportement et pouvant même mener à leur mort. (Ranatunga et al., 2023; Yadav & Devi, 2017)

Les pyréthrinaïdes font partie des insecticides les plus utilisés à l'heure actuelle et font face à peu de restrictions spécifiques en dehors de l'interdiction européenne de l'utilisation de la perméthrine dans les produits phytosanitaires depuis 2000. Les produits phytosanitaires autorisés à l'heure actuelle contiennent principalement de la cyperméthrine ou de la deltaméthrine. Les pyréthrinaïdes font très fréquemment partie de la composition de médicaments antiparasitaires vétérinaires (fluméthrine, deltaméthrine, perméthrine...) et de biocides (cyperméthrine, perméthrine, tétraméthrine...). Concernant les biocides à usage domestique, l'étude « Pesti'Home » menée par l'Anses en 2014 montre que les substances de la famille des pyréthrinaïdes ont un taux d'utilisation nettement supérieur à ceux des autres insecticides : plus de 65 % des 1 500 ménages inclus dans l'étude stockent et utilisent des produits biocides

contenant au moins un pyréthrianoïde. (ANMV, 2025; Anses, 2019; Décision 2000/817/CE concernant l'interdiction de la substance active perméthrine dans les produits phytosanitaires, 2000; ECHA, 2025)

- Les organochlorés

Comme développé précédemment, les organochlorés forment l'une des plus anciennes familles d'insecticides synthétiques et ont été massivement utilisés des années 1940 aux années 1970. Le DDT, principal organochloré, maintient les canaux NaV ouverts, provoquant une dépolarisation neuronale persistante causant des convulsions et la mort des nuisibles par paralysie (**Figure 30**). En tant que substances PBT et POP hautement persistantes et toxiques, les organochlorés ont été progressivement interdits en France, à l'échelle européenne et aux Etats-Unis entre les années 1970 et 1990, pour tous les usages (produits phytosanitaires, médicaments antiparasitaires vétérinaires, biocides). A l'échelle internationale, la plupart des organochlorés sont soumis à la convention de Rotterdam depuis 1998 et à la convention de Stockholm (annexe A : aldrine, chlordane, dieldrine... ; annexe B : DDT) depuis 2001. Le DDT, interdit en France depuis 1972, fait figure d'exception en appartenant à l'annexe B de la convention de Stockholm, autorisant son utilisation dans les pays en développement dans le cadre de la lutte antivectorielle du paludisme. (Richardson et al., 2019; SRC & FAO, 2023; SSC, 2023)

b. Pesticides ciblant des organismes végétaux : les herbicides

En éliminant les adventices (« mauvaises herbes »), les herbicides jouent un rôle important dans la protection des cultures et améliorent la quantité et la qualité des récoltes. Près de la moitié des pesticides utilisés dans le monde sont des herbicides : en 2022, ils représentaient 47,5 % des pesticides agricoles, suivis par les insecticides (29,5 %) et les fongicides (17,5 %). Malgré leurs mécanismes d'action ciblant plutôt spécifiquement les organismes végétaux, l'utilisation intensive de pesticides et la persistance de leurs résidus dans l'environnement entraînent des conséquences sur les santés humaines et animales. Les arthropodes sont particulièrement concernés, que ce soit indirectement via la destruction de leur habitat ou directement par intoxication. Les intoxications aux herbicides ont rarement un effet létal, mais les effets sublétaux (modifications comportementales, reprotoxicité...) sont nombreux et variés. Ainsi, de nombreuses études se sont intéressées aux effets des herbicides sur les araignées. (Baćmaga et al., 2024; Pekár, 2012)

Les produits herbicides sont généralement composés de nombreuses substances actives et adjuvants, rendant l'identification des substances nocives complexes. De plus, la toxicité d'une substance active n'est parfois observée que lors de son utilisation avec certains adjuvants, ou lorsqu'elle est combinée avec une ou plusieurs autres substances actives (on parle alors d'effet cocktail). Enfin, il s'avère

que les adjuvants, qui ne devraient pourtant jouer qu'un rôle structurel, présentent parfois une toxicité envers les organismes non-cibles. Parmi les études concernant les araignées aranéomorphes, les deux principales substances actives herbicides étudiées sont le glyphosate et l'acide 2,4-dichlorophénoxyacétique (2,4-D). (Baćmaga et al., 2024; Richardson et al., 2019)

- Le glyphosate

Commercialisé depuis 1974, le glyphosate est de loin la substance active herbicide la plus utilisée au monde. Le glyphosate est un organophosphoré non inhibiteur des cholinestérases qui exerce une activité herbicide en inhibant la 5-énolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSPS), une enzyme intervenant dans la voie de l'acide shikimique, voie essentielle à la biosynthèse de protéines chez les plantes et les bactéries. L'absence de cette voie métabolique chez les animaux a été à l'origine d'une sous-estimation de la toxicité potentielle du glyphosate chez ces espèces. Pourtant, le glyphosate et ses formulations (notamment le produit phytosanitaire Roundup) provoque de nombreux effets nocifs (modifications comportementales, altérations métaboliques, neurotoxicité, reprotoxicité...) chez des espèces animales très variées (arthropodes, vers de terre, oiseaux, organismes aquatiques, humains...). Bien que l'origine de la toxicité du glyphosate chez les animaux ne soit pas à ce jour totalement élucidée, plusieurs mécanismes sont incriminés : perturbation du microbiote intestinal, induction d'un stress oxydatif causant des atteintes cellulaires, perturbation endocriniennes, toxicité causée par des adjuvants ou par des synergies et effets cocktails... (Baćmaga et al., 2024; Richardson et al., 2019)

Le glyphosate est un herbicide total qui agit sur toutes les plantes, adventices ou non. Ainsi, il est principalement utilisé dans l'agriculture entre la récolte d'une culture et le semis de la suivante afin d'éliminer tous les végétaux encore présents sur le champ. Il présentait également un usage en tant que biocide chez les particuliers et dans les espaces verts des collectivités, ce qui est désormais interdit par la loi Labbé. En effet, la découverte de la potentielle toxicité du glyphosate envers les santés environnementales, animales et humaines a mené à la mise en place d'une réglementation spécifique et la réalisation d'études internationales. En Europe et en France, une réévaluation du glyphosate en 2023 autorise son utilisation jusqu'à 2033 car cette toxicité débattue ne s'observe que lors d'exposition à des doses peu compatibles avec les recommandations agricoles actuelles. Cette autorisation est limitée à l'usage agricole professionnel et nécessite l'utilisation de formulations limitant les risques pour les organismes non-cibles : alors que plus de 200 produits contenant du glyphosate étaient disponibles en France en 2018, seuls 14 sont commercialisés en 2025. (Anses, 2024; E-Phy, 2025)

- Le 2,4-D

Le 2,4-D est une substance active herbicide très utilisée depuis sa commercialisation au cours des années 1940. C'est un herbicide auxinique : sa structure similaire à l'auxine, phytohormone permettant la croissance végétale, permet d'induire chez les adventices une croissance incontrôlée menant à leur mort. Le 2,4-D est un herbicide persistant, peu absorbé par le sol et très soluble dans l'eau : il est ainsi estimé que près de 92% du 2,4-D utilisé se retrouve, à terme, dans l'eau. Cela menace tout d'abord les organismes aquatiques, mais également les organismes terrestres via la pollution des eaux souterraines. L'intoxication aigue ou chronique au 2,4-D peut provoquer des effets variés (troubles de la croissance, modifications comportementales, reprotoxicité...) chez de nombreuses espèces (végétaux, animaux et microorganismes). Cette toxicité est particulièrement marquée chez les organismes aquatiques car ils sont exposés à des concentrations élevées de 2,4-D, parfois létales. Les insectes présentent quant à eux majoritairement des troubles de la croissance, expliquant l'intérêt d'étudier l'impact du 2,4-D sur d'autres arthropodes tels que les araignées. Les différents mécanismes expliquant la toxicité du 2,4-D sur les animaux sont similaires à ceux impliqués dans la toxicité du glyphosate : induction d'un stress oxydatif via la libération de dérivés réactifs de l'oxygène, action sur les hormones thyroïdiennes à l'origine de troubles endocriniens, génotoxicité... (Islam et al., 2018)

Contrairement au glyphosate, le 2,4-D est un herbicide sélectif, dont l'action toxique se limite aux adventices en épargnant les graminées (céréales et herbes). Ainsi, son utilisation permet l'élimination des adventices au cours de la pousse des graminées dans les champs. Jusqu'à l'application de la loi Labbé, le 2,4-D pouvait également être utilisé par des particuliers et par les agents municipaux pour l'entretien des espaces verts. En France, les seuls produits contenant du 2,4-D autorisés à ce jour sont des produits phytosanitaires, destinés à un usage agricole professionnel exclusif. (E-Phy, 2025; Islam et al., 2018)

PARTIE 2 : CONSEQUENCES DE L'EXPOSITION DES ARAIGNEES ARANEOMORPHES AUX PESTICIDES

I. Modalités d'exposition des araignées aux pesticides

Les araignées aranéomorphes peuvent être exposées à des pesticides de façon passive via l'exposition environnementale à des pesticides (contamination topique directe) ou à leurs résidus (contamination résiduelle de surface ou orale), ou de façon active via la prédation (contamination orale).

1. Exposition environnementale passive des araignées aux pesticides

a. Contamination topique directe par pulvérisation de pesticides

Lors de contaminations directes, les araignées sont exposées à des quantités importantes de pesticides pénétrant dans l'organisme par voie topique. Ces expositions environnementales directes sont observées lors de l'utilisation de produits biocides ou phytosanitaires.

Les araignées côtoyant nos habitations et bâtiments (notamment celles appartenant aux familles des Theridiidae, des Agelenidae ou encore des Pholcidae) peuvent être ciblées par des produits biocides à usages domestiques ou professionnels quand elles sont considérées comme étant nuisibles, par exemple pour les personnes arachnophobes. De plus, bien que l'immense majorité des araignées retrouvées dans nos maisons soient inoffensives (en France), certaines peuvent tout de même présenter un risque pour la santé d'individus fragiles tels que les nourrissons et les individus allergiques. Ainsi, de nombreux produits biocides contenant généralement des pyréthrinoïdes ciblent spécifiquement les araignées. Ils peuvent exercer une action létale rapide via la pulvérisation directe d'un aérosol sur l'araignée à éliminer, ou peuvent présenter une éventuelle action répulsive ou létale retardée sous d'autres formes commerciales : fumigation, laque... (ECHA, 2025)

En occupant le même milieu de vie que des arthropodes nuisibles aux cultures (champs, vergers...), certaines araignées peuvent également être en contact direct avec des gouttelettes de pesticides émises lors de la pulvérisation de produits phytosanitaires dans l'environnement. Cette exposition directe varie selon la méthode de chasse, le comportement ou encore la taille des araignées. Ainsi, les araignées chassant à l'approche (Lycosidae, Philodromidae, Salticidae) ou à l'affût (Thomisidae), les araignées diurnes et les araignées de grande taille sont les plus exposées à la pulvérisation directe de pesticides. Concernant les araignées tissant des toiles, l'exposition est plus importante pour les orbitèles (Araneidae, Tetragnathidae) se tenant au centre de leur toile géométrique que pour les araignées cachées dans des loges ou tissant des toiles irrégulières. (Pekár, 1999, 2013)

b. Contamination par exposition aux résidus de pesticides présents dans l'environnement

Dans l'environnement, les araignées peuvent également être exposées à de faibles quantités de pesticides ou à leurs résidus. Selon les caractéristiques physico-chimiques des pesticides et la localisation de leur résidu (sol, eau, végétaux...), les araignées peuvent être contaminées par voie topique en se déplaçant sur des surfaces polluées ou par voie orale lors de l'abreuvement. Selon les familles de pesticides et d'araignées, l'exposition à des résidus peut représenter la principale voie d'absorption de pesticides par les araignées. Par exemple, en exposant *Oedothorax apicatus* (Linyphiidae) à de la deltaméthrine par trois voies (topique, orale et résiduelle), Mullié et Everts (1991) ont démontré que la majorité de la deltaméthrine absorbée par ces araignées provient d'une contamination résiduelle de surface (56 %) et que cette voie d'intoxication est à l'origine de 76 % des effets sublétaux observés par la suite. Ce type de contamination par des résidus concerne principalement les produits phytosanitaires et les médicaments antiparasitaires vétérinaires.

L'utilisation intensive de produits phytosanitaires depuis près d'un siècle est à l'origine d'une contamination environnementale importante et globale. Les résidus persistant dans l'environnement menacent les animaux et les végétaux, mais également les champignons et les organismes unicellulaires. La diversité des produits utilisés a mené à la contamination de tous types d'habitats, menaçant ainsi l'ensemble des familles d'araignées. Par exemple, les araignées chassant à l'approche sur le sol sont menacées par des résidus de DDT, celles chassant sur des végétaux peuvent être intoxiquées par des résidus de néonicotinoïdes (imidaclopride) ou de glyphosate, tandis que les araignées ripariennes sont en contact avec des résidus de pesticides persistant dans l'eau tels que les néonicotinoïdes ou encore le 2,4-D. Même les résidus d'organophosphorés ou de pyréthri-noïdes, pourtant peu persistants et rapidement dégradés, peuvent menacer certaines espèces : dans une étude de Pekár (1999) portant sur la phosalone (OP) et la perméthrine, *Clubiona neglecta* (Clubionidae), une espèce nocturne chassant à l'approche, est particulièrement sensible aux résidus des pesticides pulvérisés en journée comparativement à des Lycosidae et Philodromidae diurnes. (Coots et al., 2013; Graf et al., 2019)

Les médicaments antiparasitaires vétérinaires sont également à l'origine d'une contamination environnementale persistante. Pour les animaux de rente, les principales molécules concernées sont des endectocides appartenant à la famille des lactones macrocycliques. Par exemple, l'éprinomectine est émise sous forme active et persistante dans les fèces des bovins pendant au moins cinq mois après son administration, réduisant le nombre et la diversité des arthropodes (notamment les insectes coprophages tels que les bousiers) dans la zone d'élevage. De nombreuses études récentes montrent que les traitements appliqués aux animaux de compagnie contaminent également l'environnement. Des pesticides issus de médicaments antiparasitaires canins se retrouvent dans de très nombreux milieux par divers mécanismes (**Figure 31**) : eaux usées (suite au nettoyage des chiens), eaux de

surface (baignade, pluie), sol et plantes (urine et fèces), nids d'oiseaux (poils)... Les principales molécules concernées sont des néonicotinoïdes (imidaclopride), des phénylpyrazoles (fipronil) et des pyréthrinoïdes (perméthrine), toutes susceptibles d'intoxiquer des araignées. Depuis l'interdiction européenne de l'usage agricole de l'imidaclopride et du fipronil, les antiparasitaires vétérinaires sont par ailleurs les principaux produits responsables de leur présence importante dans l'environnement. En Grande-Bretagne, Tassin de Montaigu et al. (2025) ont par exemple mis en évidence la présence d'imidaclopride, de fipronil et de perméthrine dans 90 à 100 % des nids d'oiseaux utilisant des poils de chiens dans leur construction (103 nids testés), tandis que Perkins et al. (2024) estiment que 20 à 40 % des molécules d'imidaclopride et de fipronil retrouvées dans les eaux usées proviennent de médicaments antiparasitaires vétérinaires. La contamination environnementale causée par les médicaments antiparasitaires vétérinaires peut ainsi menacer des araignées vivant dans tous types d'environnement. (Diepens et al., 2023; Nieman et al., 2018)

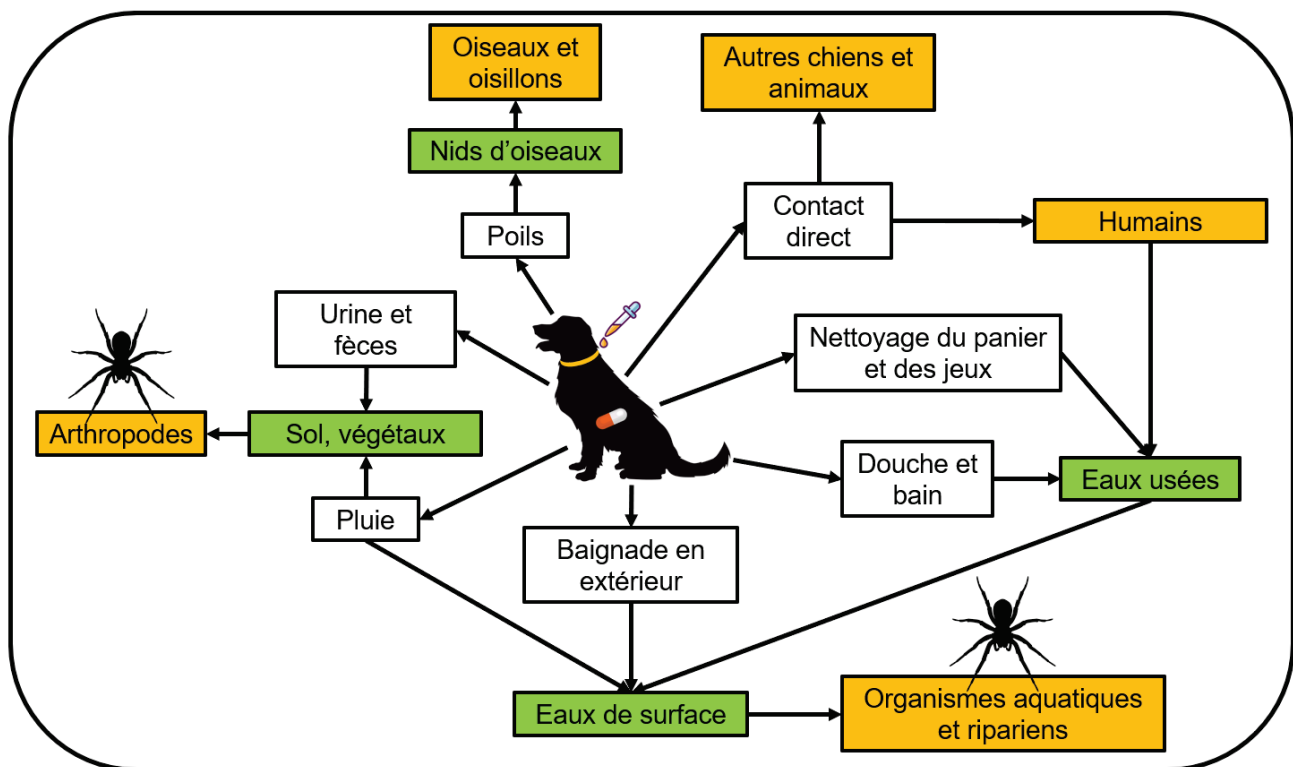


Figure 31 : Mécanismes de transfert des médicaments antiparasitaires canins dans divers milieux et espèces exposées aux résidus de ces pesticides

Les médicaments antiparasitaires vétérinaires contaminent l'environnement par différents mécanismes, indépendamment de leur présentation (pipettes spot-on, colliers, comprimés...). Les araignées aranéomorphes sont notamment exposées aux résidus se retrouvant dans le sol, les végétaux et les eaux de surface. Bien que cet exemple n'illustre que l'espèce canine, les médicaments antiparasitaires vétérinaires d'autres espèces contaminent également l'environnement par des mécanismes plus ou moins similaires ou spécifiques. (D'après Diepens et al., 2023)

c. Contamination par accumulation de substances toxiques sur les toiles des araignées

Intuitivement, les araignées chassant à l'aide de toiles pourraient sembler moins exposées aux pesticides que les araignées chassant à l'approche car contrairement à ces dernières, elles ne se déplacent que très peu en dehors de leur toile. Pourtant, à cause de leurs structures et de leurs formes, les toiles peuvent accumuler des substances toxiques, telles que des pesticides et leurs résidus.

Les toiles géométriques des araignées orbitèles (Araneidae, Tetragnathidae) sont particulièrement efficaces pour collecter les produits phytosanitaires pulvérisés dans les champs. Samu et al. (1992) ont par exemple montré qu'indépendamment de la méthode de pulvérisation utilisée, l'absorption par unité de surface d'une toile d'épeire diadème (*Araneus diadematus*) est plus de 20 fois supérieure à celle du papier (en l'occurrence, du papier de chromatographie). Cette absorption est d'autant plus importante que les gouttelettes sont fines, ce qui correspond malheureusement à la méthode de pulvérisation de produits phytosanitaires la plus efficace et la plus fréquemment utilisée. Les araignées orbitèles vivant en milieu agricole sont donc très exposées aux pesticides qui y sont pulvérisés. Cette exposition est aggravée par la position centrale de ces araignées sur leur toile (contamination topique directe), ainsi que par leur comportement : en consommant leur toile pour la recycler, les araignées orbitèles s'intoxiquent également par voie orale. (Rhoades & Stoddard, 2021)

Les araignées ne tissant pas de toiles géométriques sont légèrement moins exposées aux produits phytosanitaires car la structure de leurs toiles limite la collecte des gouttelettes pulvérisées. Les toiles tridimensionnelles très irrégulières des Theridiidae jouent même un rôle protecteur vis-à-vis de leur exposition directe aux pesticides. En revanche, les toiles en entonnoir tissées par les Agelenidae, ni nettoyées ni détruites, sont propices à l'accumulation de poussières, particules et substances PBT telles que les ETM (« métaux lourds »). (Pekár, 1999; Rybak, 2015)

2. Exposition active des araignées par prédation de proies contaminées

Les araignées peuvent également être exposées à des pesticides et leurs résidus via leur alimentation. En tant qu'espèces prédatrices, les araignées peuvent consommer des proies ayant elles-mêmes été contaminées par des pesticides présents dans l'environnement. Par rapport à l'exposition directe à des pesticides ou à leurs résidus, la consommation de proies contaminées n'est que rarement à l'origine d'un effet léthal chez les araignées. Les effets sublétaux à court terme sont également généralement moins importants que lors d'intoxications causées par d'autres voies d'exposition (topique directe ou résiduelle). (Mullié & Everts, 1991; Pekár, 2012; Wiśniewska et al., 2022)

La principale conséquence de la prédation de proies contaminées est la bioaccumulation de substances PBT au sein de l'organisme des araignées. Cette contamination active s'ajoute à la contamination passive issue de l'exposition environnementale des araignées aux pesticides. Le phénomène de bioaccumulation a été étudié et décrit à de nombreuses reprises chez les araignées, notamment pour celles vivant dans des zones très exposées telles que les zones ripariennes. Parmi les substances PBT bioaccumulées par les araignées des zones ripariennes, on retrouve des pesticides tels que les néonicotinoïdes, ou encore des ETM tels que le mercure. En bioaccumulant des substances toxiques par prédation, les araignées peuvent agir en tant que sentinelles de la pollution environnementale : plus une araignée est contaminée par des substances PBT, plus son milieu de vie est pollué. (Pennuto & Smith, 2015; Roodt et al., 2023)

3. Détection et détoxification des pesticides

Les araignées aranéomorphes font ainsi face à de nombreuses sources d'exposition aux pesticides. Cette exposition peut néanmoins être limitée par la détection de certaines substances par les araignées et la fuite des milieux contaminés. En effet, grâce aux chémorécepteurs présents sur l'extrémité distale (les tarses) de leurs pédipalpes et membres locomoteurs, les araignées sont capables de détecter certaines substances chimiques présentes dans leur environnement. Pekár et Haddad (2005) ont ainsi montré que des araignées peuvent détecter des résidus récents d'organophosphorés (phosalone) et de pyréthrinoïdes (perméthrine) et les éviter : les araignées chassant à l'approche (représentées ici par des Lycosidae et Philodromidae) se déplacent vers des surfaces saines, tandis que les araignées tissant des toiles (ici, Theridiidae) évitent les surfaces polluées en construisant une toile sur un support en hauteur. Des études plus récentes ont pu mettre en évidence que certaines araignées sont capables de détecter des résidus de néonicotinoïdes, ou encore que des araignées chassant à l'affût, telles que les Sparassidae, peuvent également détecter les résidus de pesticides présents dans l'environnement. La détection des résidus de pesticides par les araignées présente néanmoins des limites, en manquant notamment d'efficacité chez les individus jeunes ou pour les résidus anciens. De nouvelles études permettraient d'identifier si cette détection est présente chez toutes les espèces d'araignées, ou encore si certains pesticides courants échappent à toute détection. (Gabellone et al., 2022; Molina et al., 2023)

Malgré cette capacité de détection, les araignées restent très exposées aux pesticides. Suite à la contamination d'une araignée par une substance active, des mécanismes enzymatiques de détoxification peuvent se mettre en place. Tout d'abord, certaines enzymes, telles que les carboxylestérases, permettent la dégradation des pesticides dans l'organisme des araignées, à l'image des enzymes hépatiques des mammifères. Wang et al. (2006) ont montré que l'activité de cette enzyme est plus

importante chez les araignées vivant dans des champs exposés aux pesticides que chez celles vivant dans des champs traités biologiquement. Cela peut suggérer que les araignées sont capables de développer des mécanismes de résistance aux pesticides, comme cela a pu être observé chez d'autres arthropodes tels que les espèces nuisibles ciblées par les traitements phytosanitaires. (Pekár, 2012)

En plus de leur action spécifique sur le système nerveux, les pesticides ont un impact sur le métabolisme des araignées en provoquant un choc oxydatif via la libération de dérivés réactifs de l'oxygène. Ces dérivés sont à l'origine de destructions moléculaires (protéines, lipides...) et cellulaires, entraînant ainsi un important déséquilibre métabolique. Pour limiter cette oxydation, des enzymes présentant des propriétés antioxydantes sont produites par les araignées. Des études toxicologiques ont permis l'identification de diverses enzymes antioxydantes dont l'activité augmente au cours des heures suivant l'intoxication d'une araignée par des pesticides : catalases, superoxydes dismutases, glutathion S-transférase... Ces enzymes catalysent des réactions chimiques permettant, à terme, un rétablissement de l'homéostasie : elles jouent donc un rôle important dans la guérison des araignées à la suite d'intoxications non létales. (Gabellone et al., 2022; Molina et al., 2023)

II. Effets des pesticides sur les araignées aranéomorphes

Les conséquences des pesticides sur les araignées sont très variées. Parmi les effets directs, on distingue l'effet létal et les effets sublétaux. L'effet létal correspond au décès d'une araignée suite à son intoxication, tandis que les effets sublétaux désignent toutes les modifications comportementales et physiologiques provoquées par une exposition non létale à des pesticides. Enfin, les effets des pesticides sur les araignées peuvent également être indirects, en diminuant le nombre de leurs proies ou en détruisant leur milieu de vie.

1. Effet létal : mortalité des araignées par intoxication

a. Expositions favorisant la survenue de l'effet létal

L'exposition des araignées à des quantités importantes de pesticides peut avoir un effet létal. Cet effet est notamment recherché lors de l'utilisation de biocides à usages domestiques et professionnels afin d'éliminer les araignées côtoyant nos habitations, parfois considérées comme nuisibles. Les principaux biocides visant les araignées sont des bombes d'aérosols contenant des pyréthrinoïdes, permettant une exposition topique directe importante et instantanée provoquant très rapidement la mort de l'araignée visée. En se basant sur la plus récente étude portant sur l'utilisation domestique des pesticides en France (l'étude « Pesti'Home » réalisée par l'Anses en 2014), les araignées sont fréquemment ciblées par des biocides domestiques. En effet, 17,2 % des ménages français avaient utilisé au moins un produit biocide sur une araignée au cours de l'année 2014. Les araignées étaient alors les quatrièmes nuisibles les plus ciblés par les biocides visant des arthropodes volants et rampants, derrière les moustiques (42,6 %), les mouches (35,7 %) et les fourmis (32 %), mais devant les guêpes et frelons (13,8 %), les cafards et blattes (9,4 %) et les acariens de maison (6,3 %). (Anses, 2019)

L'effet létal est néanmoins bien plus problématique lors de l'utilisation de produits phytosanitaires visant des organismes nuisibles aux cultures. En effet, les araignées étant des auxiliaires des cultures, leur élimination peut impacter négativement la qualité et la quantité des récoltes. La pulvérisation des produits phytosanitaires dans les champs peut être à l'origine d'un contact direct des pesticides sur les araignées, notamment lorsque les gouttelettes de pesticides sont fines. L'effet létal survient alors plus fréquemment chez les araignées présentant des facteurs de risque favorisant leur exposition topique directe à des gouttelettes de pesticides : chasse à l'approche ou à l'aide d'une toile géométrique, taille importante, mode de vie diurne... Enfin, les résidus de produits phytosanitaires et de médicaments antiparasitaires vétérinaires présents dans l'environnement peuvent également présenter un effet létal sur les araignées. Cette exposition résiduelle létale concerne notamment les araignées exposées à des quantités importantes de résidus dans leur milieu de vie (zones de cultures très polluées, zones ripariennes...), ainsi que les individus présentant des sensibilités particulières à certains pesticides. (Pekár, 1999; Samu et al., 1992)

b. Principaux pesticides ayant un effet létal sur les araignées

Cette sous-partie vise à résumer les tendances globales identifiées par les études toxicologiques ayant été réalisées au cours des dernières décennies. La diversité des protocoles réalisés (voie d'exposition, concentrations, durée...), des substances actives utilisées (type de pesticide, famille de pesticide, molécule précise...) et des araignées étudiées (mode de chasse, famille, espèce...) sont à l'origine de résultats variables, voire parfois contradictoires. Néanmoins, certaines molécules particulièrement mortelles pour les araignées aranéomorphes ont pu être identifiées.

De manière générale, les insecticides et acaricides sont bien plus mortels pour les araignées que les herbicides et fongicides, ce qui n'est pas très surprenant au vu de leurs mécanismes d'action respectifs. En s'intéressant aux études s'approchant le plus des conditions du terrain (concentrations en pesticides similaires aux produits disponibles sur le marché ; concentrations résiduelles comparables à celles présentes dans l'environnement...), les familles chimiques présentant le plus d'effet létal direct sur les araignées sont les organochlorés, les organophosphorés, les pyréthriinoïdes et les carbamates. En revanche, l'effet létal direct des néonicotinoïdes n'est que rarement rapporté, contrairement à leurs très nombreux effets sublétaux qui peuvent à terme amener au décès des araignées. Étonnamment, le spinosad, un bio-insecticide fréquemment utilisé en agriculture biologique dans les vergers, présente un effet létal bien plus marqué que les néonicotinoïdes malgré leurs mécanismes d'action similaires. Cet effet létal est par ailleurs considérablement exacerbé par la répétition des pulvérisations de spinosad dans les champs. (Pasquet et al., 2015; Pekár, 2012; Řezáč et al., 2021)

L'effet létal direct des herbicides et fongicides n'est que très rarement documenté. Une méta-analyse de 2023 montre par ailleurs que les araignées sont les auxiliaires des cultures les moins sensibles à l'effet létal direct des herbicides. Alors que l'exposition des araignées à des substances actives pures ne provoque pas leur mortalité, l'effet létal des herbicides et fongicides n'est rencontré que lors de l'utilisation de produits phytosanitaires, suggérant le rôle essentiel des adjuvants des formulations commerciales dans la survenue de la mortalité des araignées. En améliorant les caractéristiques physico-chimiques des produits phytosanitaires, les adjuvants permettent une meilleure dispersion et absorption des substances actives par les organismes cibles (végétaux) ou non-cibles tels que les araignées. Ainsi, dans l'étude des effets létaux causés par les herbicides et fongicides, il semble plus judicieux de s'intéresser aux formulations commerciales spécifiques plutôt qu'aux substances actives au vu du rôle important joué par les adjuvants. (Niedobová et al., 2019; Ward et al., 2022; Zilnik et al., 2023)

c. Facteurs modulant la létalité des pesticides

De nombreux paramètres font varier la létalité des pesticides envers les araignées. Tout d'abord, des facteurs propres aux pesticides utilisés peuvent limiter ou empirer leur létalité. Ainsi, la présence de substances actives en concentrations très importantes dans l'environnement (par exemple suite à la pulvérisation de produits phytosanitaires) et la persistante importante de certains pesticides sous forme résiduelle augmentent l'exposition des araignées aux molécules et sont à l'origine d'un effet léthal plus important. Les associations de pesticides entre eux ou avec des adjuvants peuvent également moduler leur létalité. Par exemple, en exposant des araignées à des résidus de pesticides, Pekár et Beneš (2008) ont montré que l'effet léthal était maximal pour des résidus d'un produit phytosanitaire composé de chlorpyrifos-éthyl et de cyperméthrine (100 % de mortalité pour toutes les espèces d'araignées étudiées), tandis qu'il était très variable pour des résidus d'un produit ne contenant que de la deltaméthrine (entre 0 et 90 % de létalité), malgré la similarité des deux molécules pyréthrinoïdes (**Figure 32**). L'association de l'organophosphoré et du pyréthrinoïde semble donc ici augmenter la létalité individuelle des molécules, ce qui est cohérent avec leurs mécanismes d'action : il y a une synergie entre l'inhibiteur des acétylcholinestérases et le perturbateur des canaux NaV. A l'inverse, des associations de pesticides peuvent diminuer leur létalité individuelle. Ward et al. (2022) ont étudié cinq produits phytosanitaires herbicides commercialisés aux Etats-Unis ainsi qu'une solution consistant en un mélange de ces cinq produits, et ont comparé leur létalité sur des araignées. Ils ont pu mettre en évidence que le produit à base de mésotrione seule avait un effet léthal plus important que le mélange des cinq produits, suggérant que les autres substances actives (atrazine, glyphosate, rimsulfuron, S-métolachlore) limiteraient l'action de la mésotrione.

Des facteurs dépendants des araignées peuvent moduler la létalité des pesticides. Tout d'abord, comme développé dans le paragraphe II.1.a en page 83, certains paramètres augmentent l'exposition des araignées à des concentrations importantes de pesticides, maximisant leur effet léthal. En dehors de l'exposition variable aux pesticides, des facteurs spécifiques aux araignées interviennent dans la modulation de la létalité des substances actives. L'effet léthal d'une substance active varie ainsi considérablement selon les familles et espèces d'araignées. Par exemple, l'étude de Pekár et Beneš (2008) développée dans le paragraphe précédent montre une variabilité importante de l'effet léthal de résidus d'un produit phytosanitaire à base de deltaméthrine selon les espèces et selon l'âge des résidus. Ainsi, un contact avec des résidus récents a provoqué la mortalité de 90 % des *Dictyna uncinata* (Dictynidae), tandis qu'aucune des *Pardosa palustris* (Lycosidae) testées n'en est décédée (**Figure 32**). Chaque famille d'araignées, voire chaque espèce, peut donc présenter une sensibilité spécifique à chaque pesticide. (Pekár, 2012)

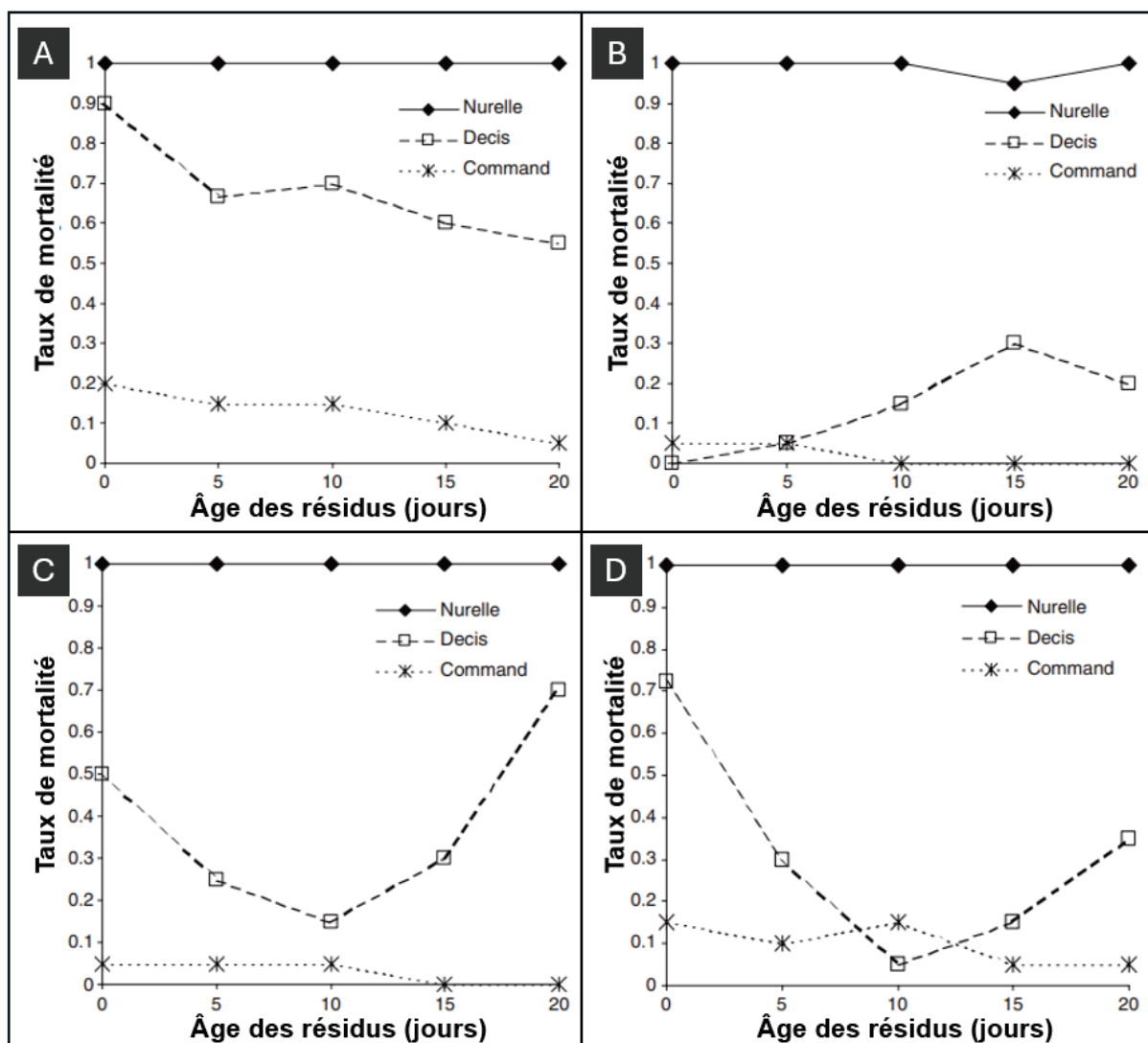


Figure 32 : Modulation de l'effet létal par des facteurs propres aux pesticides et aux araignées

(A) : *Dictyna uncinata* (Dictynidae) ; (B) : *Pardosa palustris* (Lycosidae) ; (C) : *Philodromus cespitum* (Philodromidae) ; (D) : *Phylloneta impressa* (Theridiidae) ; Nurelle : insecticide composé de chlorpyrifos-éthyl (OP) et cyperméthrine (pyréthrianoïde) ; Decis : insecticide composé de deltaméthrine (pyréthrianoïde) ; Command : herbicide composé de clomazone (inhibiteur d'une enzyme nécessaire à la photosynthèse)

Dans cette étude de Pekár et Beneš (2008), quatre espèces d'araignées ont été exposées à des résidus de trois produits phytosanitaires. Ces graphiques illustrent la mortalité de chaque espèce suite à l'exposition à des résidus de chaque produit, âgés de 0, 5, 10, 15 et 20 jours.

Pour toutes les espèces et pour tous les âges, les résidus de Nurelle (OP + pyréthrianoïde) provoquent un taux de mortalité bien plus important que ceux de Decis (pyréthrianoïde), illustrant l'aggravation de l'effet létal des pesticides par leur association.

Alors que l'effet létal de Nurelle et Command est similaire pour toutes les espèces, on remarque que celui de Decis est très variable. *Dictyna uncinata* (A) est très sensible à Decis, tandis que la faible sensibilité de *Pardosa palustris* (B) augmente avec l'âge des résidus. Enfin, la sensibilité des deux autres araignées (C et D) est importante face à des résidus jeunes (0 jour) et âgés (20 jours), mais faible sinon. Ainsi, l'effet létal des résidus de ce pesticide est modulé par leur âge, et par l'espèce d'araignée à qui ils sont exposés.

(D'après Pekár & Beneš, 2008)

2. Effets sublétaux : modifications comportementales et physiologiques non létales

L'exposition d'une araignée à des doses non létales de pesticides peut causer des effets sublétaux variés. Bien que toutes les voies d'exposition puissent intoxiquer les araignées avec de faibles doses de pesticides, l'exposition résiduelle prédomine dans la survenue des effets sublétaux. L'usage massif des pesticides a amené à la contamination de la quasi-totalité des habitats des araignées, les exposant à des résidus en concentrations plus ou moins importantes. Il est ainsi estimé que les araignées sont plus fréquemment exposées à des doses sublétales de pesticides qu'à des doses létales. De très nombreux effets sublétaux ont été décrits depuis le début des années 2000. Ce travail s'intéressera notamment aux altérations de la mobilité des araignées, de leur aptitude à chasser (avec une toile ou par capture directe), de leur développement et de leur reproduction. Bien qu'elles se rétablissent en moyenne en quelques jours, les araignées intoxiquées par des doses sublétales de pesticides ne peuvent temporairement plus assurer leur rôle écologique (dont notamment la prédation d'espèces nuisibles), provoquant un déséquilibre à l'échelle du réseau trophique. (Pekár, 2013)

a. Altération de la mobilité

L'effet sublétaux le plus fréquemment observé chez les araignées consiste en une modification de leur activité locomotrice. De manière générale, les insecticides et acaricides entraînent une diminution de la mobilité des araignées à cause de leur mode d'action neurotoxique. En effet, à faibles doses, la perturbation de la communication neuronale (au niveau des synapses ou des canaux NaV) causée par ces molécules altère le fonctionnement de l'appareil locomoteur des araignées, sans pour autant causer leur mort. Cet effet sublétaux a principalement été étudié sur des araignées chassant à l'approche car la locomotion est particulièrement importante chez ces espèces très mobiles. (Pekár, 2012)

Ainsi, des araignées-loups (Lycosidae) exposées de façon topique directe et résiduelle à des néonicotinoïdes à doses commerciales (aux Etats-Unis, ces produits phytosanitaires étant interdits en UE) ont présenté une diminution sévère de leurs vitesses moyennes et maximales et de leur distance parcourue en 10 minutes, avant de retrouver leurs capacités locomotrices normales au bout de 24 heures. De plus, les jeunes araignées intoxiquées présentaient une incapacité à se mettre en position pour effectuer du ballooning, limitant leur dispersion. Cette inhibition de la mobilité peut même se traduire par une paralysie temporaire non létale, comme observé par Gabellone et al. (2022) chez *Misumenops maculissparsus* (Thomisidae) suite à l'administration orale d'imidaclopride. Les organophosphorés et les pyréthri-noïdes peuvent également limiter la mobilité des araignées. Suite à une exposition résiduelle à des pesticides de ces familles, *Pardosa palustris* (Lycosidae) a présenté pendant 12 heures une démarche lente, de l'incoordination, et des déplacements erratiques (**Figure 33**). (Pekár, 2013; Pekár & Beneš, 2008; Řezáč et al., 2021, 2022)

A l'inverse, les intoxications sublétales peuvent parfois provoquer une augmentation de la mobilité des araignées. Cet effet est principalement observé avec les herbicides. Par exemple, l'exposition de *Philodromus cespitum* (Philodromidae) à des résidus de nombreux herbicides commerciaux fréquemment utilisés dans les vergers a provoqué une augmentation importante de sa mobilité : en 30 minutes, les araignées intoxiquées ont parcouru une distance trois (2,4-D et glyphosate) à sept (halosulfuron-méthyl) fois plus importante que les araignées témoins ! De la même manière, suite à une exposition résiduelle au clomazone, *Pardosa palustris* (Lycosidae) a présenté une mobilité augmentée en se déplaçant rapidement et de façon erratique (**Figure 33**). (Pekár & Beneš, 2008; Schmidt-Jeffris et al., 2022)

Enfin, comme développé précédemment, les araignées peuvent être repoussées par les pesticides et leurs résidus lorsqu'elles les perçoivent avec leurs chémorécepteurs tarsaux. Alors que les effets répulsifs des néonicotinoïdes, des pyréthriinoïdes et des organophosphorés sont régulièrement décrits dans la littérature, les rares effets répulsifs observés avec des produits herbicides sont attribués à leurs surfactants et non à leurs substances actives. (Gabellone et al., 2022; Molina et al., 2023; Pekár, 2012; Pekár & Beneš, 2008)

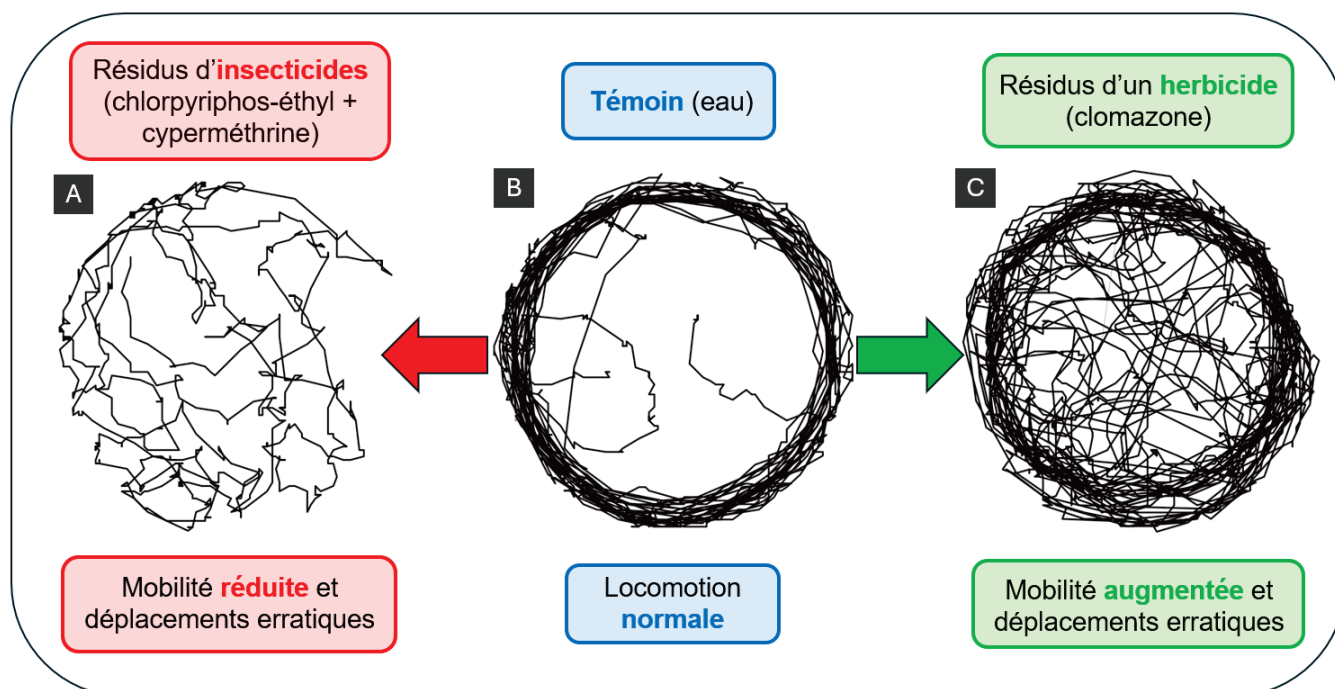


Figure 33 : Altération de la mobilité suite à une exposition résiduelle de pesticides chez des Lycosidae

Chaque image représente le trajet effectué par des *Pardosa palustris* (Lycosidae) dans un récipient circulaire pendant une durée de deux heures.

Alors que les araignées témoins (B) se déplacent principalement sur les parois du récipient, la locomotion des araignées exposées à des résidus d'insecticides (organophosphorés et pyréthriinoïdes, (A)) est sévèrement réduite et leurs déplacements très irréguliers se font essentiellement au centre du récipient. Enfin, celles exposées à des résidus d'un herbicide (C) se sont déplacées davantage que les témoins, et ont parcouru de manière erratique l'ensemble de la surface du récipient. (D'après Pekár & Beneš, 2008)

L'atteinte de la mobilité des araignées entrave l'ensemble de leurs capacités (déplacement, chasse, reproduction, tissage de toiles, dispersion...) et limite leur survie. Tout d'abord, les altérations locomotrices réduisent considérablement les capacités de prédation des araignées, notamment pour celles chassant à l'approche. De même, la répulsion exercée par certains pesticides limite la prédation des nuisibles par les araignées dans les milieux cultivés. Une deuxième conséquence de cet effet subléthal est l'augmentation de la vulnérabilité des araignées face à leurs prédateurs : alors qu'une araignée paralysée ou ralentie est plus facilement dévorée, une araignée dont le mouvement est exacerbé est plus facilement repérée par ses prédateurs. Enfin, une araignée dont les mouvements sont entravés suite à une intoxication subléthale peut être incapable de fuir les surfaces polluées par des pesticides, augmentant ainsi son exposition à ces substances toxiques et risquant une intoxication encore plus sévère, voire létale. (Pekár & Beneš, 2008; Řezáč et al., 2022)

b. Atteinte de la capacité à tisser des toiles fonctionnelles

Les pesticides peuvent sévèrement nuire aux araignées chassant à l'aide de toiles. Le tissage des toiles est une faculté complexe nécessitant des capacités locomotrices intègres, notamment pour les toiles géométriques des araignées orbitales : les insecticides neurotoxiques tels que les pyréthrinoïdes sont ainsi les principaux pesticides causant cet effet subléthal. Par exemple, l'application topique de cyperméthrine sur des épeires diadèmes (*Araneus diadematus*, Araneidae) a retardé la formation des toiles de plusieurs jours, tandis que les toiles formées par la suite (jusqu'à deux semaines après l'intoxication subléthale) étaient petites et comportaient peu de rayons (**Figure 34, A**). Rhoades et Stoddard (2021) se sont quant à eux intéressés à la contamination orale d'araignées orbitales (*Leucauge argyrobapta*, Tetragnathidae) lors du recyclage de leur toile polluée par une pulvérisation de perméthrine diluée (pour limiter la survenue de l'effet létal). Alors que toutes les araignées témoins avaient reconstruit leur toile au bout de 24 heures, seules 29 % des araignées intoxiquées en avaient tissé une nouvelle. Ensuite, jusqu'à 3 jours après la contamination, les toiles des araignées intoxiquées étaient par ailleurs plus petites et très irrégulières. (Samu & Vollrath, 1992)

Des effets similaires ont été observés avec d'autres pesticides. Une étude française a exposé *Agalenatea redii* (Araneidae) à diverses doses de spinosad par voie topique. En excluant les doses trop importantes causant la mortalité des araignées, il a été observé que plus la dose de spinosad appliquée était importante, moins les araignées étaient capables de tisser des toiles fonctionnelles. Ainsi, aux concentrations classiquement utilisées dans les vergers français, seulement 27 % des araignées exposées ont tissé une toile dans la semaine suivant leur intoxication, contre 94 % du groupe témoin. Bien que le spinosad soit un insecticide neurotoxique, il est possible que cette substance active impacte directement la production de soie des araignées. Les mécanismes à l'origine de la survenue de cet effet subléthal sont d'autant plus méconnus pour les herbicides car leur mode d'action n'est normalement

pas neurotoxique. Par exemple, l'intoxication orale d'*Alpaida veniliae* (Araneidae) par prédation de proies contaminées par un produit phytosanitaire à base de glyphosate a empêché la formation de toiles pendant plus de deux semaines, et les toiles tissées par la suite n'avaient une organisation normale que dans 20 % des cas (**Figure 34, B**) ! L'origine de cette altération majeure de la capacité à tisser des toiles est encore actuellement peu comprise au vu du mode d'action du glyphosate. De plus, en l'absence d'étude mettant en évidence cet effet subléta chez des araignées intoxiquées uniquement par la substance active, il n'est pas possible d'exclure la potentielle importance des adjuvants dans la survenue de la toxicité subléta des produits phytosanitaires herbicides. (Benamú et al., 2010; Pasquet et al., 2015)

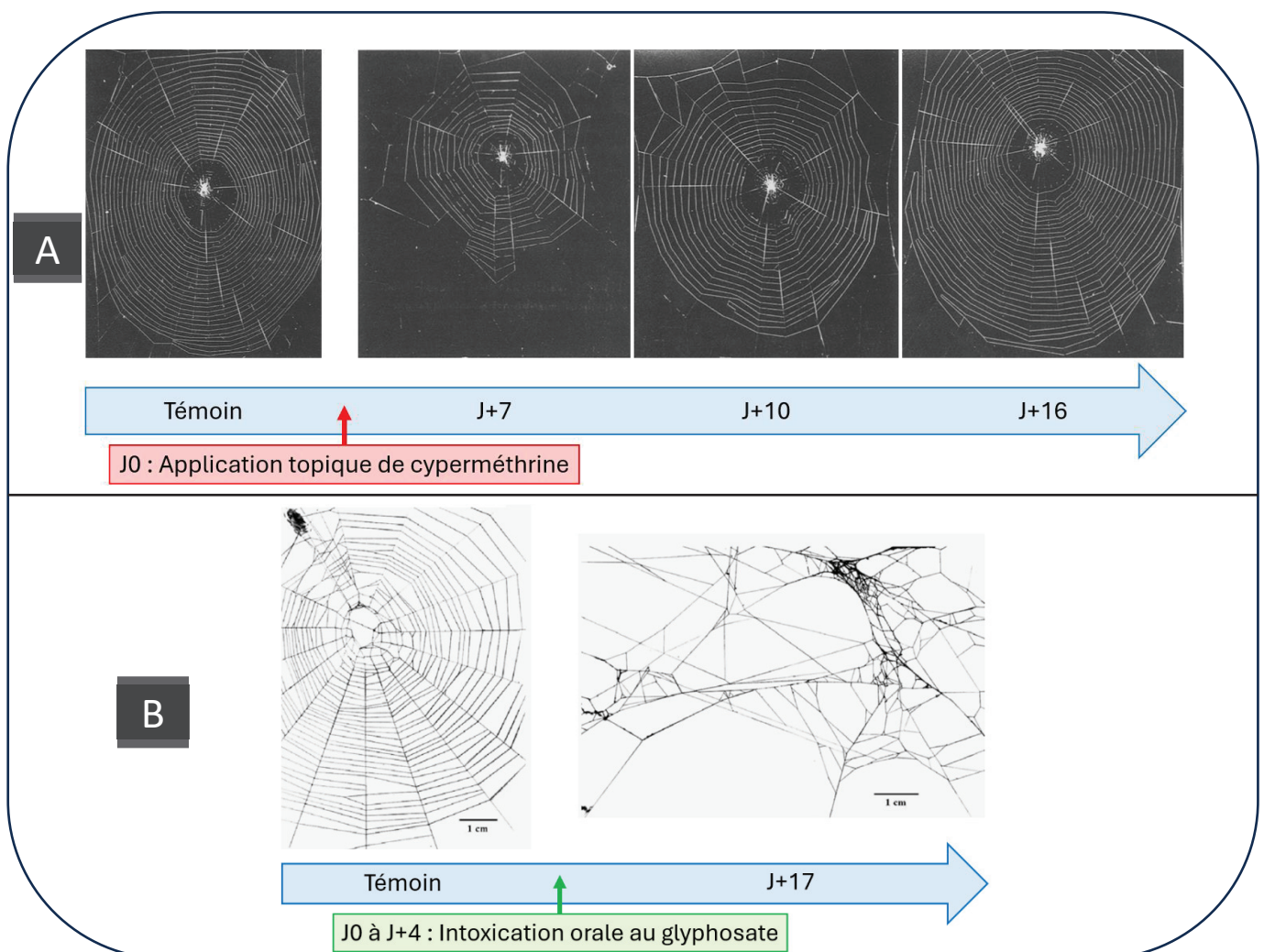


Figure 34 : Altération de la capacité à tisser des toiles chez des araignées orbitales

(A) : L'intoxication d'épeires diadèmes avec de la cyperméthrine par voie topique a empêché la fabrication de toiles pendant une semaine. Les premières toiles (tissées sept jours après l'exposition au pesticide) étaient nettement plus petites et désorganisées que celles du groupe témoin et cet effet subléta a persisté jusqu'à deux semaines après l'exposition.

(B) : Suite à la consommation de proies contaminées au glyphosate, des *Alpaida veniliae* ont été incapables de tisser une toile pendant deux semaines. Dix-sept jours après l'exposition, 80 % des toiles tissées avaient une organisation très irrégulière.

(D'après : (A) Samu & Vollrath, 1992 ; (B) Benamú et al., 2010)

Les pesticides peuvent ainsi grandement nuire aux araignées chassant à l'aide de toiles. En empêchant tout d'abord le tissage de toiles pendant plusieurs jours (voire plusieurs semaines), puis en limitant par la suite la capacité des araignées à construire des toiles de tailles, d'organisations et de formes normales, cet effet subléta a des conséquences importantes sur la survie des araignées chassant à l'aide de toiles. Ces araignées, déjà affaiblies suite à une intoxication par une substance pesticide, ne peuvent pas efficacement capturer des proies et se nourrir pendant parfois plusieurs semaines, menaçant leur survie et limitant leur rôle de prédation des nuisibles qui sont pourtant les cibles initiales des produits pesticides. (Pasquet et al., 2015; Rhoades & Stoddard, 2021)

c. Altération de la capacité de capture des proies

Les capacités de chasse des araignées chassant à l'approche ou à l'affût peuvent également être altérées par l'exposition à des pesticides. Généralement, l'intoxication subléta des araignées entrave leur mobilité et retarde la détection des proies, ce qui est à l'origine d'une chasse moins efficace. Cela a notamment été observé chez les Lycosidae et Philodromidae, suite à des intoxications topiques par des insecticides appartenant à de nombreuses familles : pyréthrinoides (cyperméthrine), néonicotinoïdes (imidaclopride), organochlorés (acétamipride)... Des herbicides peuvent également parfois provoquer cet effet subléta. Schmidt-Jeffris et al. (2022) ont par exemple montré que des *Pelegrina aeneola* (Salticidae) exposées à des molécules sulfonilurées (rimsulfuron, halosulfuron-méthyl) capturent 20 à 30 % moins de proies que la normale jusqu'à 5 jours après l'intoxication. Alors que de nombreux autres herbicides limitent les capacités de prédation des araignées chassant à l'approche (mésotrione, glufosinate...), le glyphosate ne semble pas provoquer cet effet subléta chez ces familles d'araignées. (Niedobová et al., 2019; Pekár, 2012, 2013; Ward et al., 2022)

D'autres effets ont été plus rarement observés. Étonnamment, des pesticides peuvent parfois temporairement augmenter l'activité de prédation des araignées. Petcharad et al. (2018) ont par exemple observé que des *Philodromus cespitum* (Philodromidae) exposées à des résidus de produits phytosanitaires (non commercialisés en France) contenant du spinosad et du méthoxyfénoside ont tué deux fois plus de proies que les araignées du groupe témoin sur la même durée. Cette étude a également mis en évidence que les pesticides peuvent modifier le choix des proies des araignées en entravant leurs capacités sensorielles. En proposant deux proies (des araignées de la famille des Theridiidae et des insectes ravageurs de la famille des Psyllidae) aux araignées, les chercheurs ont pu montrer qu'alors que les araignées saines préféraient significativement les Theridiidae, les individus intoxiqués consommaient les deux proies de façon équivalente. En favorisant la consommation de ravageurs, l'augmentation de l'activité de prédation et la modification du régime alimentaire des araignées pourraient sembler bénéfiques aux cultures. Néanmoins, en occupant temporairement une niche écologique qui n'est pas la leur, les araignées

intoxiquées pourraient être à l'origine de perturbations du réseau trophique à l'échelle écosystémique. De plus, contrairement à la diminution de l'efficacité de la chasse, ces altérations n'ont été que très rarement relevées dans la littérature, rappelant que de très nombreux paramètres peuvent modifier les résultats des études toxicologiques des araignées : espèces étudiées, conditions environnementales, familles et doses des pesticides, quantités et espèces des proies... (Petcharad et al., 2018)

d. Perturbation du comportement reproducteur des adultes et du développement des jeunes

La perturbation du comportement reproducteur des araignées est un effet subléthal important des pesticides. Tout d'abord, les altérations de la mobilité causées par les insecticides neurotoxiques et certains herbicides limitent la réalisation des comportements reproducteurs des araignées à tous les niveaux : parade, rapprochement, accouplement, ponte des œufs, formation du cocon et comportements maternels. Au-delà de cette atteinte consécutive aux altérations de la mobilité, le comportement reproducteur des araignées peut être modifié de façon plus directe lors d'intoxications sublétales à certains pesticides. (Pekár, 2012)

Bien que la littérature ne mentionne que rarement d'altérations des comportements de parades chez les araignées mâles intoxiquées par des pesticides, ceux-ci sont moins souvent acceptés par les femelles que les mâles sains. Ainsi, plusieurs études menées sur des araignées-loups exposées à des résidus de pesticides employés dans le respect des pratiques agricoles ont montré que l'accouplement était plus rare chez les individus intoxiqués, notamment parce que les mâles exposés étaient plus fréquemment dévorés par les femelles que les individus sains. Cela a par exemple été observé chez des *Rabidosa rabida* (Lycosidae) intoxiquées par des résidus d'un insecticide organophosphoré (malathion), ou encore chez des *Tigrosa helluo* (Lycosidae) exposées à des résidus de glyphosate. (Godfrey et al., 2024; Sentenská et al., 2021; Tietjen, 2006)

Les effets sublétaux des pesticides peuvent également survenir suite à l'accouplement et provoquer une diminution de la fécondité des araignées. En exposant de jeunes *Pardosa pseudoannulata* (Lycosidae) à des résidus de glyphosate avant leur maturité sexuelle, Yu et al. (2024) ont mis en évidence diverses atteintes de leur fécondité à l'âge adulte par rapport aux individus sains (**Figure 35**), avec une diminution de 30 % de la réussite des accouplements (formation d'un cocon viable), de 36 % du nombre d'œufs pondus par chaque femelle et de 7 % du nombre d'œufs ayant éclos par cocon. Benamú et al. (2010) ont observé de tels effets reprotoxiques chez *Alpaida veniliae* (Araneidae), qu'ils ont pu relier à une déformation ainsi qu'à une diminution significative du diamètre des ovaires chez les araignées exposées à des résidus de glyphosate.

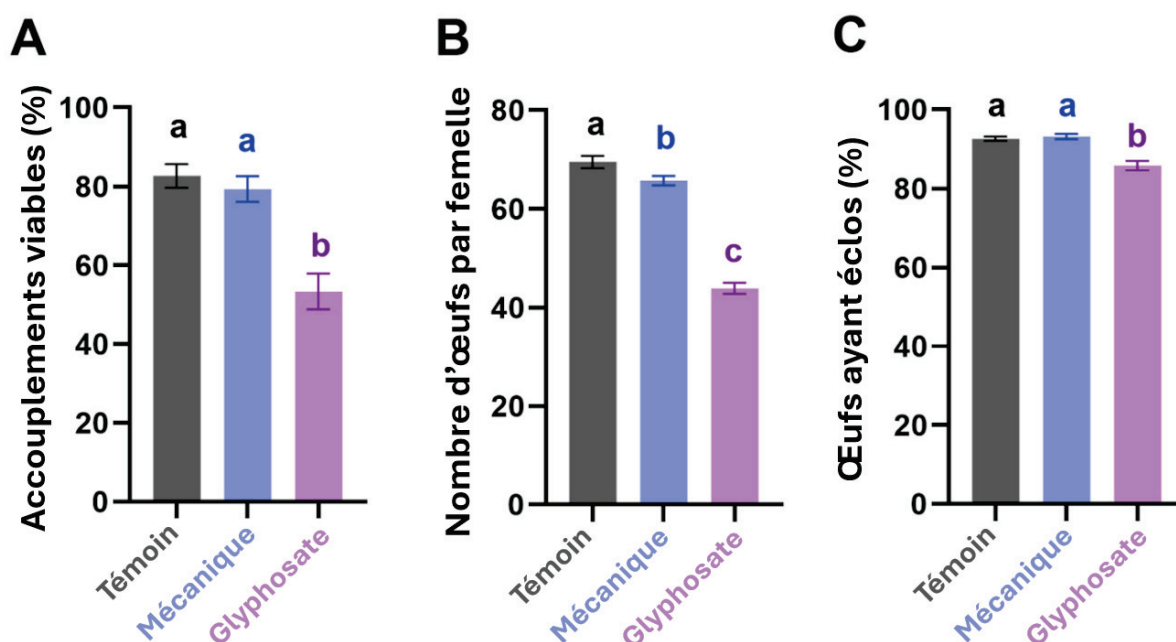


Figure 35 : Diminution de la fécondité de *Pardosa pseudoannulata* (Lycosidae) suite à leur exposition à des résidus de glyphosate avant leur maturité sexuelle

Témoin = araignées issues d'une partie d'un champ de riz non exposé à un traitement particulier ; Mécanique = araignées issues d'une partie d'un champ de riz ayant subi un désherbage mécanique ; Glyphosate = araignées issues d'une partie d'un champ de riz ayant subi une pulvérisation de glyphosate à 3 000 grammes par hectare.

Alors que le traitement mécanique n'a que peu d'effets sur la fécondité des araignées, les araignées ayant été exposées au glyphosate avant leur maturité sexuelle présentent une fécondité très altérée une fois à l'âge adulte. Les accouplements des araignées exposées sont moins viables (A), les femelles pondent moins d'œufs (B) et les œufs éclosent légèrement moins fréquemment (C). (D'après Yu et al., 2024)

Les pesticides peuvent également contaminer les cocons des araignées. Cela peut tout d'abord modifier les comportements maternels des araignées qui en présentent en temps normal, telles que les araignées-loups. Par exemple, la contamination topique externe de cocons par de la cyperméthrine (pyréthrianoïde), du chlorpyrifos-éthyl (OP) ou encore de l'imidaclopride (néonicotinoïde) a limité la manipulation du cocon chez *Pardosa saltans* (Lycosidae) et a multiplié par six le temps nécessaire aux mères pour accrocher le cocon à leurs filières. Bien que non décrit dans la littérature, des doses plus importantes pourraient théoriquement repousser les mères et les pousser à abandonner leur cocon. (Laino et al., 2021)

Enfin, l'exposition des mères avant la ponte, ainsi que la contamination directe des cocons dans l'environnement peuvent mettre en danger les œufs et altérer le développement des jeunes araignées. Les pesticides peuvent ainsi provoquer la mort des jeunes avant leur éclosion et être à l'origine d'une diminution de la fécondité des araignées intoxiquées. L'intoxication des œufs peut également être à l'origine d'effets sublétaux chez les jeunes araignées : stress oxydatif, réduction de l'activité des

acétylcholinestérases (notamment avec les organophosphorés), diminution de la taille et de la masse à l'âge adulte, allongement du temps nécessaire au développement (mue plus lentes et plus espacées)... Peng et al. (2010) ont par ailleurs montré le caractère intergénérationnel de ces effets sublétaux : la contamination de mères *Hylyphantes graminicola* (Linyphiidae) par un mélange de diméthoate (organophosphoré) et de fenvalérate (pyréthrin) avant leur accouplement a provoqué des atteintes du développement chez leurs jeunes pourtant non exposés directement à ces pesticides. (Benamú et al., 2010; Laino et al., 2021)

e. Autres effets sublétaux

Les effets sublétaux des pesticides sur les araignées aranéomorphes sont très variés. Les principaux ayant été détaillés précédemment, cette sous-partie propose une énumération succincte d'autres effets sublétaux plus rarement rapportés dans la littérature.

Les pesticides peuvent avoir des effets sur le métabolisme des araignées. Tout d'abord, comme développé dans le paragraphe 1.3 en page 81, le métabolisme des araignées met en place des mécanismes enzymatiques de détoxification permettant l'élimination des molécules toxiques suite à une exposition non létale aux pesticides. Une autre conséquence métabolique de certains pesticides neurotoxiques tels que les organophosphorés est la diminution de l'activité des acétylcholinestérases, à l'origine de nombreux autres effets sublétaux par action neurotoxique (altération de la mobilité, de la chasse, de la reproduction...). Enfin, l'augmentation de l'activité d'enzymes antioxydantes permet de limiter les conséquences du choc oxydatif provoqué par l'exposition à des molécules pesticides. (Gabellone et al., 2022; Laino et al., 2021; Molina et al., 2023)

Ce choc oxydatif, lié à la libération de dérivés réactifs de l'oxygène, est par ailleurs à l'origine de lésions aux échelles moléculaires et tissulaires. Par exemple, l'intoxication orale de *Misumenops maculisparsus* (Thomisidae) par de l'imidaclopride a provoqué des modifications tissulaires au niveau d'organes impliqués dans la détoxification (les glandes des diverticules intestinaux du céphalothorax) : nécrose, destruction de l'épithélium et séparation marquée entre les organes internes et la cuticule externe. De telles modifications histologiques ont également été observées par Molina et al. (2023) suite à l'exposition résiduelle de *Polybetes pythagoricus* (Sparassidae) à du chlorpyrifos-éthyl. Ces lésions tissulaires pourraient limiter les capacités de détoxification des araignées et les rendre ainsi encore plus vulnérables lors de futures intoxications. (Gabellone et al., 2022)

Enfin, les pesticides peuvent limiter les capacités immunitaires des araignées en provoquant une diminution du nombre d'hémocytes (cellules immunitaires assurant notamment le rôle de la phagocytose) circulant dans leur hémolymphe, ce qui les rend plus vulnérables aux infections. (Pekár, 2012; Wiśniewska et al., 2022)

3. Effets indirects : action des pesticides sur les proies des araignées et sur leur milieu de vie

Les effets des pesticides sur les araignées ne sont pas uniquement directs (létaux et sublétaux). En affectant les proies des araignées ou en altérant leur milieu de vie, les pesticides ont des effets indirects sur les araignées et menacent leur survie.

a. Raréfaction des proies et diminution de leur qualité nutritionnelle

Les pesticides employés dans les milieux de vie des araignées exercent des effets létaux, sublétaux et indirects sur de très nombreux organismes. Parmi ces organismes, on retrouve tout d'abord les nuisibles ciblés par les traitements pesticides, mais également un grand nombre d'organismes non-cibles. Les insecticides et acaricides provoquent ainsi la mort d'arthropodes par action neurotoxique (entre autres), tandis que les herbicides et fongicides limitent leur survie en supprimant de potentiels abris et des ressources alimentaires. Enfin, face à ces menaces chimiques, les arthropodes survivants peuvent être considérablement affaiblis et présenter de faibles qualités nutritionnelles pour leurs prédateurs. L'utilisation de pesticides est donc à l'origine d'une raréfaction des proies des araignées, ainsi que d'une diminution des qualités nutritionnelles des proies survivantes. (Mayntz et al., 2003; Pekár, 2012)

Les araignées sont des prédateurs particulièrement résilients, capables de s'adapter et de survivre malgré des prises alimentaires rares et très espacées dans le temps. Par ailleurs, la raréfaction des proies habituelles des araignées peut les pousser à modifier leur régime alimentaire afin de se nourrir d'autres arthropodes, ce qui peut néanmoins limiter la qualité de leurs apports nutritionnels, notamment dans les milieux pollués par des pesticides. En étudiant de jeunes *Zygiella x-notata* (Araneidae), Mayntz et al (2003) ont montré que la raréfaction des proies ne provoque pas la mort des araignées, mais ralentit leur croissance en augmentant la durée entre les mues, ce qui diminue leur poids et leur taille à l'âge adulte. A l'inverse, des apports nutritionnels de faible qualité sont à l'origine d'une augmentation de la mortalité des juvéniles, ainsi que d'une diminution de la fécondité des femelles. Ainsi, en affectant les proies des araignées, les pesticides limitent indirectement la survie, la croissance et les capacités de reproduction des araignées. (Huszarik et al., 2024)

b. Raréfaction des végétaux et altération du milieu de vie des araignées

En supprimant des végétaux et en altérant la couverture végétale de leur milieu de vie, les herbicides (glyphosate, 2,4-D...) ont des effets indirects sur les araignées. La raréfaction des végétaux induit une diminution du nombre d'abris et de supports soutenant les toiles des araignées et limite la survie de leurs proies herbivores. Ces effets indirects altèrent les capacités de chasse des araignées tout en les exposant davantage à leurs propres prédateurs, ce qui menace leur survie. Cette altération du milieu de vie présente des effets marqués sur les populations d'araignées, modifiant l'abondance de certaines espèces ainsi que leur répartition dans l'environnement.

Comme les familles d'araignées tissant des toiles dépendent de l'organisation végétale de leur milieu de vie, elles sont particulièrement vulnérables aux effets indirects des herbicides. Par exemple, au cours d'une étude britannique réalisée en 2001, l'application de glyphosate en bordure d'un champ a provoqué une réduction significative de la hauteur et de la complexité de la couverture végétale, entraînant une diminution de moitié de l'abondance de *Tenuiphantes tenuis* (Linyphiidae) indépendamment de potentiels effets létaux ou sublétaux. (Asteraki et al., 1992; Haughton, Bell, Boatman, et al., 2001; Pekár, 2012)

4. Effets variables, méconnus ou sous-estimés nécessitant la poursuite d'études toxicologiques

a. L'hormèse : stimulation des araignées exposées à de faibles doses de pesticides

L'hormèse correspond à une réponse positive d'un organisme suite à une exposition à de très faibles doses d'un composé toxique, tel qu'un pesticide. Alors que des doses plus élevées sont à l'origine d'effets sublétaux voire létaux, de faibles doses peuvent ainsi améliorer temporairement les capacités de l'organisme intoxiqué (**Figure 36**). Ce phénomène, encore peu compris à l'heure actuelle, n'est que rarement observé et étudié dans la littérature scientifique globale. Dans le domaine de l'écotoxicologie, l'hormèse a notamment été observée chez des arthropodes nuisibles exposés à des produits phytosanitaires, participant ainsi en partie à leur résistance et résilience face aux pesticides dont ils sont les cibles. (Guedes & Cutler, 2014)

Dans la littérature, l'hormèse n'a été que très rarement mise en évidence chez les araignées aranéomorphes exposées à des pesticides. Parmi ces quelques cas, l'effet le plus fréquemment rencontré consiste en une stimulation de l'activité prédatrice des araignées. Cet effet a par exemple été observé chez *Philodromus cespitum* (Philodromidae) suite à une exposition résiduelle à du spinosad et à du méthoxyfénozide (régulateur de croissance), ainsi que chez *Hylyphantes graminicola* (Linyphiidae) suite à une application topique de méthamidophos (OP) à 10 % de la dose létale moyenne, ou encore chez des *Pardosa agrestis* (Lycosidae) mâles suite à la pulvérisation topique d'un adjuvant (Wetcit) employé en agriculture biologique aux Etats-Unis. (Deng et al., 2007; Niedobová et al., 2016; Pekár, 2012; Petcharad et al., 2018)

Bien que l'hormèse consiste en une stimulation des araignées, ce phénomène n'est pas forcément souhaitable. Tout d'abord, si les doses d'un pesticide sont suffisamment faibles pour provoquer une réaction d'hormèse chez les araignées, il est possible qu'une telle réaction se produise chez les nuisibles ciblés par le traitement, limitant son efficacité. De plus, la stimulation temporaire de l'activité prédatrice des araignées peut entraîner des conséquences négatives sur le long terme. Dans leur étude citée dans le paragraphe précédent, Niedobová et al. (2016) suggèrent par

exemple que les mâles *Pardosa agrestis* (Lycosidae) stimulés dans leur activité prédatrice pourraient théoriquement présenter une diminution de leurs comportements reproducteurs (recherche de femelles, accouplement...), menaçant les populations au long terme. Enfin, l'incidence et les conséquences de l'hormèse chez les araignées exposées à des pesticides sont probablement sous-estimées. De nouvelles recherches et études employant des doses très faibles de pesticides permettraient une meilleure compréhension de ce phénomène rare. (Guedes & Cutler, 2014; Niedobová et al., 2016)

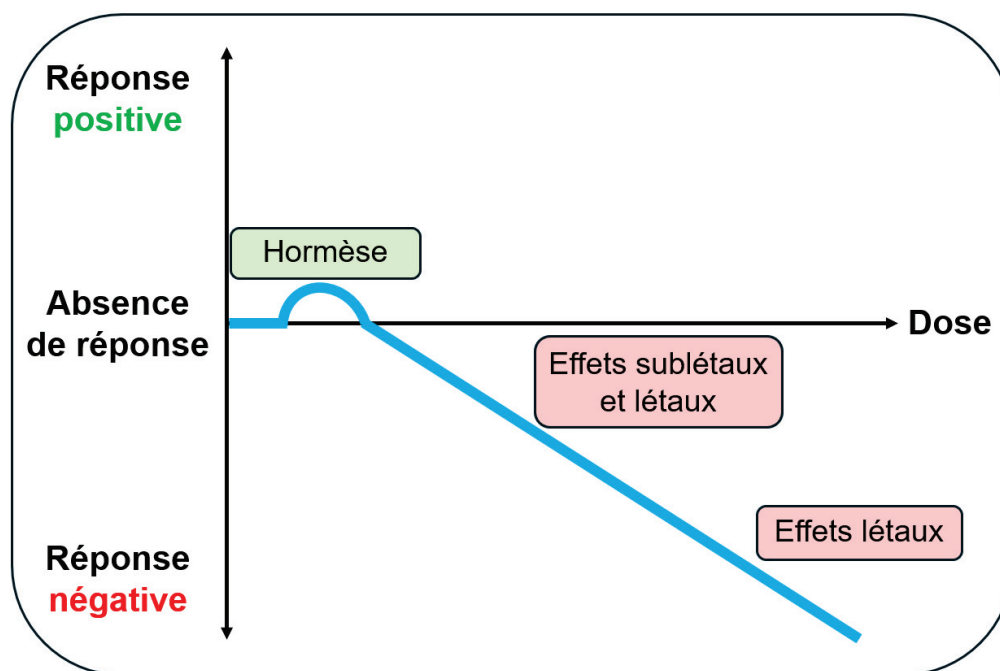


Figure 36 : Relation dose-réponse d'hormèse d'une araignée exposée à un pesticide

L'hormèse consiste en une inversion de l'effet d'un toxique chez un organisme lorsqu'il en est exposé à de très faibles doses. La relation dose-réponse d'hormèse, très rarement observée chez les araignées exposées à des pesticides, se décompose en quatre phases. A des doses extrêmement faibles, le toxique n'a aucun effet. A des doses légèrement plus élevées, le pesticide a des effets positifs et stimulants sur l'araignée. Une augmentation des doses se traduit par une réponse négative avec l'apparition d'effets sublétaux voire létaux.

Enfin, à des doses importantes, l'exposition au pesticide est généralement létale.

(Source : DENIS Clément)

b. Perspectives et sujets d'études à approfondir

Depuis le début des années 1980, les études toxicologiques portant sur l'impact des pesticides sur les araignées se sont intensifiées et multipliées. Alors que les études récentes s'intéressent à des thèmes de plus en plus complexes (impacts sur l'immunité, conséquences génétiques...), des zones d'ombres persistent et nécessitent des investigations plus approfondies.

- Toxicité des herbicides : quel est le rôle joué par les adjuvants ?

Comme développé à plusieurs reprises dans ce travail, l'interprétation des études toxicologiques portant sur des produits herbicides est complexe. En effet, les substances actives seules ne sont que rarement étudiées, les chercheurs préférant utiliser des produits phytosanitaires afin de ne pas ignorer le rôle potentiel joué par les adjuvants. Le rôle des adjuvants est effectivement loin d'être négligeable : en améliorant les caractéristiques physico-chimiques des produits et en optimisant la diffusion et l'absorption des substances actives, ils augmentent la toxicité des pesticides. Ainsi, les rares effets létaux des herbicides sur les araignées ne sont observés que lors de l'utilisation de produits phytosanitaires, et non lors de l'étude de substances actives seules. Enfin, la toxicité d'une substance active herbicide varie selon le type d'adjuvant avec lequel elle est associée. (Niedobová et al., 2016, 2019; Zilnik et al., 2023)

L'ensemble de ces observations suggère que les adjuvants employés en absence de substance active pesticide pourraient eux-mêmes présenter une toxicité envers les araignées. A ce sujet, Niedobová et al. (2016, 2019) ont étudié l'impact de la pulvérisation topique de quatre surfactants (types d'adjuvants) sur *Pardosa agrestis* (Lycosidae) et n'ont pas constaté d'effet léthal lors de leur emploi en absence de substance active herbicide. Néanmoins, tous les surfactants étudiés ont présenté un effet subléthal en diminuant les capacités de prédation des araignées pendant quelques jours. Face à ces résultats et à la rareté des études portant sur ce sujet dans la littérature, des recherches approfondies sont nécessaires afin d'identifier les potentiels effets létaux et sublétaux des adjuvants constituant les formulations commerciales des pesticides sur les araignées aranéomorphes.

- Toxicité des fongicides : un effet sous-estimé ?

Les fongicides sont les troisièmes types de pesticides les plus étudiés dans le domaine de l'écotoxicologie des araignées. D'une manière générale, très peu d'effets directs (létaux ou sublétaux) ont été rapportés lors de l'utilisation de substances actives fongicides. De façon analogue aux herbicides, les rares cas de mortalité observés suite à l'exposition d'araignées à des fongicides sont dus à l'utilisation de formulations commerciales, montrant à nouveau l'importance des adjuvants dans la potentialisation de la toxicité des pesticides. (Pekár, 2012; Reiff et al., 2024; Samu & Vollrath, 1992)

Dès lors, les fongicides ont généralement été jugés inoffensifs pour les araignées. Néanmoins, des études récentes telles que celle de Reiff et al. (2024) ont remis en question ces conclusions, en montrant que les fongicides présentent des effets indirects sur les araignées aranéomorphes. Dans cette étude allemande de grande envergure, les auteurs ont étudié les populations d'araignées dans 32 vignobles exposés à une pression plus ou moins importante en fongicides (soufre, folpel, métirame...) ; chaque vignoble étant soumis à un protocole de pulvérisation spécifique (nombre de pulvérisations, nombre de produits utilisés...). Les auteurs ont

ainsi constaté que plus un vignoble était exposé à une pression en fongicides importante, plus le nombre et la diversité des araignées y vivant étaient réduits (**Figure 37**). En limitant la survie des proies mycophages des araignées (telles que les collemboles), la répétition des traitements fongicides peut donc indirectement menacer les populations d'araignées. De nouvelles études permettraient une meilleure évaluation de l'importance de l'effet indirect des fongicides sur les araignées. (Pekár, 2012; Reiff et al., 2024)

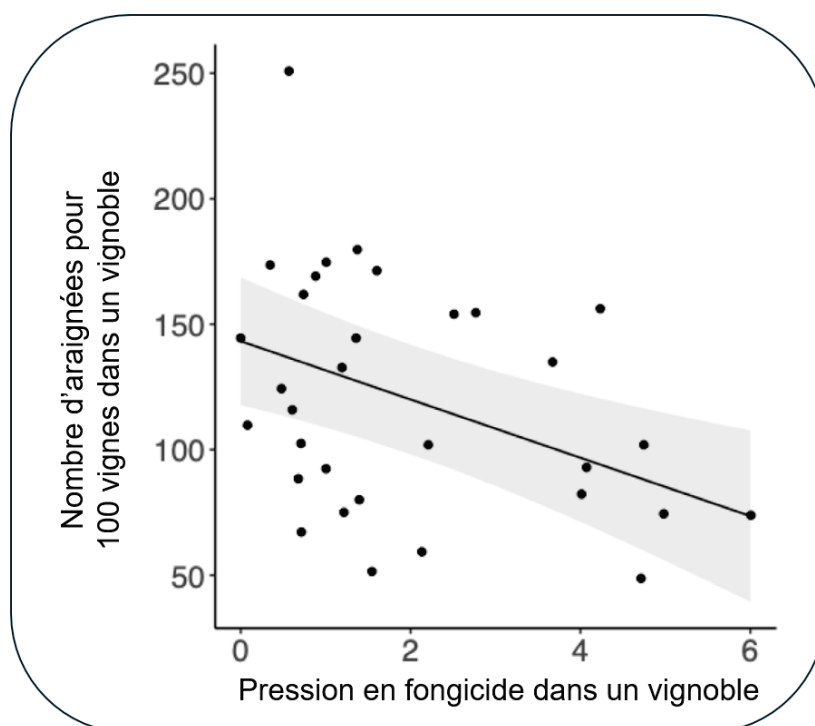


Figure 37 : Evolution de l'abondance des araignées en fonction de la pression en fongicide

Chaque point représente un des 32 vignobles étudiés et la ligne noire correspond à la droite de régression reliant l'abondance des araignées et la pression en fongicide. La pression en fongicide est notée de 0 à 6 selon la fréquence des traitements, leur répétition, ou encore la diversité des molécules employées.

On remarque qu'en moyenne, plus un vignoble subit une pression en fongicide importante, plus l'abondance des araignées y est faible : le nombre moyen d'araignées diminue de moitié entre une pression en fongicide minimale (0) et maximale (6).

(D'après Reiff et al., 2024)

- Médicaments antiparasitaires vétérinaires et produits biocides : un impact négligeable par rapport aux produits phytosanitaires ?

Les études toxicologiques sur les araignées se concentrent presque exclusivement sur les produits phytosanitaires, ignorant l'impact potentiel des autres types de pesticides. La pulvérisation intensive de ces produits agricoles dans les milieux de vie des araignées implique effectivement que les produits phytosanitaires

sont les pesticides auxquels les araignées sont les plus exposées. Néanmoins, l'exposition des araignées aux résidus de médicaments antiparasitaires vétérinaires et de produits biocides devrait être davantage prise en compte, d'autant plus que de nombreuses études montrent que ces types de pesticides contaminent l'environnement (comme exposé en **Figure 31**). En parallèle, les substances actives de ces types de pesticides étant généralement également utilisées dans l'agriculture, les preuves de la toxicité des résidus de ces substances actives envers les araignées ne manquent pas. Ainsi, en contaminant l'environnement et en contenant des molécules toxiques pour les araignées, les résidus de médicaments antiparasitaires vétérinaires et les produits biocides devraient théoriquement menacer les araignées. Pourtant, à la connaissance de l'auteur, aucune étude ne s'est intéressée aux conséquences de l'exposition des araignées à des résidus de médicaments antiparasitaires vétérinaires ou de produits biocides en concentrations comparables à celles retrouvées dans l'environnement. Bien que l'impact de ces pesticides soit proportionnellement très faible par rapport aux produits phytosanitaires déversés abondamment dans l'environnement, des études exposant des araignées à des résidus de médicaments antiparasitaires vétérinaires ou de produits biocides permettraient une meilleure évaluation de leur impact réel sur les araignées. (Diepens et al., 2023; Nieman et al., 2018)

- Innocuité apparente de certains pesticides : une utilisation sans risques ?

L'immense diversité des substances actives constituant les produits pesticides et l'utilisation préférentielle de certaines familles et molécules impliquent qu'un grand nombre de molécules ne sont que très rarement étudiées. De plus, pour une molécule donnée, les études concernant les produits phytosanitaires sont bien plus nombreuses que les études s'intéressant aux médicaments antiparasitaires vétérinaires ou aux produits biocides. La pénurie d'études ciblant des molécules peu employées limite la bonne appréciation de leur toxicité envers les araignées. En parcourant la littérature scientifique, on peut ainsi trouver des études isolées attestant que des molécules sont inoffensives pour les araignées : par exemple, l'utilisation de certains insecticides et acaricides tels que le flubendiamide et le chlorantraniliprole ou de régulateurs du développement des invertébrés tel que l'hexaflumuron semble relativement sûre. Néanmoins, l'innocuité de ces molécules pourrait dépendre entièrement des protocoles des études (doses, mode d'exposition, durée d'observation, araignées étudiées, méthodes...) et des objectifs de leurs auteurs (observations limitées à la mortalité ou prise en compte des effets sublétaux voire indirects). Dès lors, des investigations sont nécessaires afin de garantir la réelle innocuité des pesticides rarement étudiés. (Pekár, 1999; Shyamrao et al., 2022)

- Variabilité de la toxicité des pesticides : vers un contrôle et une minimisation de la toxicité ?

Enfin, même les pesticides fréquemment étudiés peuvent présenter des effets très variables d'une étude à l'autre.

Tout d'abord, on observe des variations selon des caractéristiques propres aux araignées. Au fil des études toxicologiques, il apparaît que certaines familles et certains genres d'araignées sont moins sensibles aux pesticides que d'autres. Cette variation s'explique principalement par le milieu de vie, le comportement et le mode de chasse des araignées, très variables selon leurs familles et genres. Pekár (1999) suggère ainsi que les araignées chassant à l'approche (Lycosidae, Philodromidae...), plus mobiles et plus exposées (notamment si elles sont diurnes), sont davantage sensibles aux pesticides que celles chassant à l'aide de toiles (Araneidae, Theridiidae...). Des études plus récentes semblent confirmer cette tendance, bien que certaines araignées tissant des toiles s'avèrent très sensibles aux pesticides à cause de leur accumulation sur leurs toiles. Enfin, la sensibilité des familles d'araignées varie également selon le type de pesticide employé : par exemple, les Salticidae et les Araneidae semblent peu sensibles aux effets indirects des fongicides alors qu'elles sont très sensibles aux effets létaux et sublétaux des insecticides et acaricides. (Reiff et al., 2024; Schmidt-Jeffris et al., 2022)

La toxicité apparente des pesticides peut également varier selon leur mode d'administration et la méthodologie des études. En effet, de très nombreux paramètres peuvent modifier la toxicité d'une molécule : dose employée (faible, usuelle, élevée), fréquence d'administration (unique ou répétée), type d'exposition (pulvérisation, application topique, contamination orale...), durée de l'étude (parfois trop courte pour observer des effets), effets recherchés (létaux, sublétaux, indirects)... La méthodologie des études influence donc considérablement les résultats observés et les interprétations qui en découlent. Pour s'approcher le plus des conditions réelles, il est nécessaire de multiplier les études en variant ces différents paramètres. Par exemple, c'est en augmentant les doses de glyphosate et en augmentant les fréquences d'administration des fongicides que les chercheurs ont pu mettre en évidence les effets sublétaux et indirects de ces molécules auparavant jugées inoffensives envers les araignées. (Haughton, Bell, Boatman, et al., 2001; Haughton, Bell, Wilcox, et al., 2001; Reiff et al., 2024)

Enfin, la toxicité d'un pesticide peut varier lorsqu'il est administré en association avec un ou plusieurs autres pesticides ou adjuvants. L'effet cocktail obtenu en associant des pesticides est extrêmement variable et très complexe à estimer. On observe ainsi deux principaux cas de figure selon les molécules employées : l'association de deux pesticides peut parfois maximiser leurs effets létaux et sublétaux, tandis qu'à l'inverse, deux pesticides peuvent se neutraliser et minimiser leur toxicité. (Pekár & Beneš, 2008; Ward et al., 2022)

Finalement, la multiplication des études toxicologiques portant sur l'impact des pesticides sur les araignées permet une amélioration progressive des connaissances globales en écotoxicologie. Grâce aux recherches futures, l'enrichissement de la littérature pourrait permettre l'établissement de guides de bonnes pratiques minimisant l'impact des pesticides au sens large sur les araignées aranéomorphes et sur d'autres organismes non-cibles.

PARTIE 3 : CONSEQUENCES ECOLOGIQUES DE L'EXPOSITION DES ARAIGNEES AUX PESTICIDES ET APPORT DE LEUR ETUDE DANS LA SURVEILLANCE ET LA LUTTE CONTRE LA POLLUTION ENVIRONNEMENTALE

I. Déséquilibres écosystémiques consécutifs à l'exposition des araignées aux pesticides

Les effets des pesticides sur les araignées, qu'ils soient directs (létaux, sublétaux) ou indirects, menacent leur survie à court ou long terme. Ainsi, l'utilisation des pesticides réduit l'abondance et la diversité des populations d'araignées tout en limitant leur efficacité en tant que prédateurs au sein des réseaux trophiques, provoquant des déséquilibres à l'échelle de l'écosystème (**Figure 38**).

1. Croissance des populations d'arthropodes nuisibles pourtant initialement ciblés par les pesticides

Le rôle essentiel joué par les araignées dans la régulation des populations d'arthropodes est reconnu depuis des décennies. Des études estiment ainsi qu'à l'échelle individuelle, une araignée orbitèle vivant dans un champ consomme près de 6 000 insectes au cours de sa vie, tandis qu'à l'échelle mondiale, la consommation annuelle globale des araignées est comprise entre 400 et 800 millions de tonnes de proies. L'efficacité de la prédation des araignées se traduit ainsi par une diminution de la densité des insectes ravageurs dans les agroécosystèmes où elles sont présentes en abondance. (Marc et al., 1999; Nyffeler & Birkhofer, 2017)

En diminuant l'abondance des araignées et d'autres prédateurs, les pesticides éliminent des auxiliaires des cultures essentiels au contrôle des nuisibles. De nombreuses études mettent en évidence que la diminution de la pression de prédation permise par l'utilisation de pesticides provoque un rebond rapide des populations de ravageurs pourtant ciblés par ces traitements. Bommarco et al. (2011) ont par exemple observé ce phénomène contreproductif en étudiant les conséquences de la pulvérisation fréquente de divers insecticides dans des champs de brassicacées : comparativement aux champs non traités, les populations d'araignées des champs traités étaient réduites tandis que celles de *Plutella xylostella* (lépidoptères nuisibles) étaient soit équivalentes, soit plus abondantes. De plus, en limitant ainsi la mort par prédation des individus nuisibles ayant survécu aux traitements, la pulvérisation de pesticides peut favoriser le développement de résistances chez les nuisibles ciblés, limitant d'autant plus leur régulation. (Marc et al., 1999; Sánchez-Bayo, 2021)

Enfin, en diminuant la diversité des populations d'araignées (à cause de la sensibilité particulière de certaines familles à certains pesticides), les pesticides peuvent privilégier le rétablissement de proies spécifiques. Par exemple, les araignées tissant des toiles étant les principaux prédateurs d'insectes volants dans les agroécosystèmes, l'altération de leurs capacités de tissage par des insecticides neurotoxiques peut favoriser le rebond rapide de nuisibles volants. Rhoades et Stoddard (2021) mettent ainsi en évidence que le rôle important de *Leucauge argyrobapta* (Tetragnathidae) dans la lutte antivectorielle contre les moustiques *Aedes aegypti* est mis en péril par la pulvérisation aérienne de perméthrine aux Etats-Unis. Alors que le traitement insecticide permet effectivement l'élimination temporaire des nuisibles, il limite également l'efficacité prédatrice des araignées en altérant leur capacité à former des toiles fonctionnelles. La faible pression de prédation exercée sur les moustiques favorise ainsi le rétablissement très rapide de leurs populations, observable seulement trois jours après la pulvérisation de perméthrine. (Marc et al., 1999)

2. Vers un potentiel déclin des espèces prédatrices d'araignées ?

L'augmentation de la mortalité des araignées exposées à des pesticides provoque une raréfaction des ressources alimentaires disponibles pour leurs prédateurs. En l'absence de données concernant l'évolution mondiale de l'abondance des araignées depuis l'intensification de l'usage des pesticides, il est difficile d'évaluer l'importance de l'éventuel déclin de leurs populations. Néanmoins, des études récentes mettent en évidence des déclins localisés, avec par exemple une diminution de 45 % des populations d'araignées dans un champ de luzerne en Hongrie en seulement 20 ans. Ces diminutions de populations menacent principalement les quelques 8 000 à 10 000 espèces prédatrices, parasitoïdes ou parasites qui ciblent exclusivement les araignées, ainsi que les 3 000 à 5 000 espèces d'oiseaux qui incluent les araignées dans leur régime alimentaire. On peut par ailleurs supposer que les insectes prédateurs exclusifs d'araignées tels que les pompiles, déjà menacés par leur propre exposition aux pesticides, sont d'autant plus affaiblis par les déclins locaux des populations de leurs uniques proies. (Nyffeler & Birkhofer, 2017; Samu et al., 2023)

De plus, tout comme les araignées peuvent s'exposer aux pesticides par voie orale lors de la prédation de proies contaminées, l'intoxication des araignées peut représenter une voie d'exposition pour les propres prédateurs. La bioaccumulation de substances PBT chez les araignées augmente d'ailleurs considérablement la propre bioaccumulation des PBT chez leurs prédateurs par bioamplification. Dans les réseaux trophiques, les oiseaux font partie des prédateurs d'araignées présentant la plus importante bioaccumulation, ce qui pourrait expliquer en partie le déclin important de leurs populations mondiales observé au cours des dernières décennies. Bowler et al (2019) ont ainsi attribué la diminution de 13 % de l'abondance des oiseaux insectivores européens (qui, par abus de langage, consomment également des araignées) entre 1990 et 2015 aux effets létaux, sublétaux et indirects de l'utilisation intensive de

pesticides. Alors que le métabolisme enzymatique des oiseaux les rend particulièrement sensibles aux pesticides, et notamment aux néonicotinoïdes, il semble judicieux de s'interroger sur l'importance de la consommation des araignées dans l'exposition des oiseaux à ces substances. Cette voie d'intoxication reste néanmoins peu étudiée et n'a été mise en évidence que pour des substances PBT non pesticides telles que les éléments-traces métalliques. (Beaubien et al., 2020; Hallmann et al., 2014; Katagi & Fujisawa, 2021; Li et al., 2020)

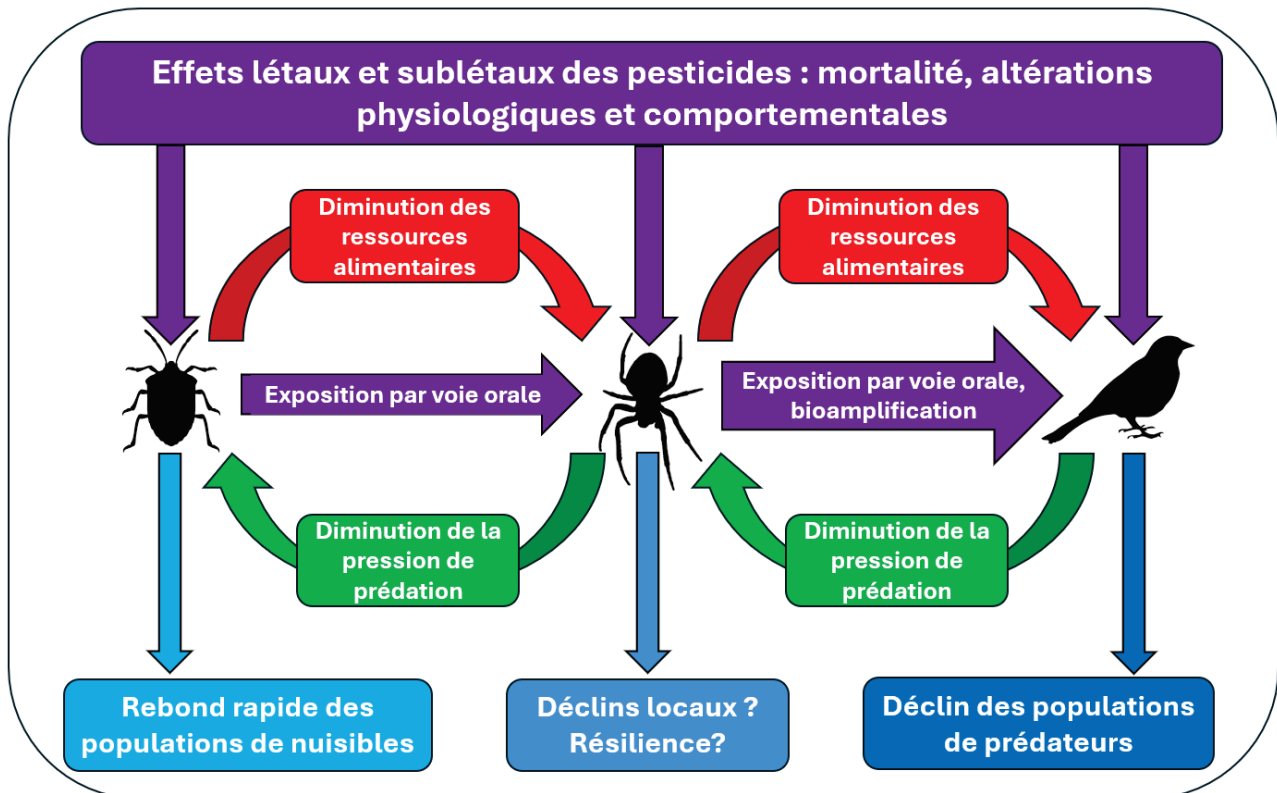


Figure 38 : Déséquilibres écosystémiques consécutifs à l'exposition des araignées aux pesticides

L'exposition des araignées aux pesticides est à l'origine d'une diminution de leur abondance et de leur diversité, ainsi que d'altérations physiologiques et comportementales chez les individus ayant survécu. Des phénomènes similaires sont observés chez les populations de proies (nuisibles) et de prédateurs (par exemple, oiseaux insectivores).

La diminution de l'accès aux ressources alimentaires et la potentielle exposition orale des araignées à des proies intoxiquées aggravent les effets directs des pesticides. Tout cela provoque une réduction de la pression de prédation des araignées sur les nuisibles, permettant un rétablissement rapide de leurs populations.

Les oiseaux insectivores sont également confrontés à la diminution des ressources alimentaires (araignées, insectes) et leur position plus haute dans le réseau trophique maximise leur exposition orale aux polluants par bioamplification. L'intoxication des oiseaux insectivores par des doses massives de pesticides et substances PBT est une des causes expliquant leur déclin, leurs cycles de vie longs ne permettant pas une résilience rapide.

Les araignées occupant une position plus centrale dans le réseau trophique, leur résilience intermédiaire pourrait expliquer la stabilité relative de leurs populations mondiales, à l'exception de déclins locaux.

(Source : DENIS Clément)

II. Utilisation des araignées en tant qu'espèces sentinelles de la pollution environnementale, causée ou non par des pesticides

1. Les araignées des zones ripariennes, sentinelles permettant la surveillance des taux de substances PBT dans l'environnement

a. Définition d'une espèce sentinelle et particularités des zones ripariennes

Historiquement, le concept d'espèce sentinelle désignait une espèce animale présentant une sensibilité particulière pour la détection de dangers environnementaux et dont l'utilisation permettait de limiter les pertes humaines. L'exemple le plus connu d'espèce sentinelle est l'emploi, au début du XX^e siècle, de canaris dans les mines de charbon afin de détecter des gaz inodores toxiques tels que le monoxyde de carbone. A cause de leur sensibilité importante à ces gaz, les canaris présentaient des symptômes d'intoxication (perte de connaissance ou décès) bien avant les humains, ce qui permettait aux mineurs de quitter les lieux avant leur propre intoxication. (*National Research Council (US) Committee on Animals as Monitors of Environmental Hazards* (NRCCAMEH), 1991)

Dans le domaine de l'écotoxicologie, une espèce sentinelle est un organisme présentant une sensibilité mesurable ou observable à certaines substances toxiques (accumulation dans les tissus, modifications biologiques ou comportementales, décès...), et dont l'étude permet la surveillance et le suivi de la pollution environnementale dans une région donnée. En étudiant les espèces sentinelles d'un polluant spécifique, il est ainsi possible d'estimer ses taux environnementaux avant la survenue de conséquences et de déséquilibres à l'échelle de l'écosystème. Les espèces sentinelles sont principalement des oiseaux, des poissons, des mollusques bivalves ou encore certains arthropodes. Par exemple, aux Etats-Unis, la mortalité accrue des oiseaux observée entre les années 1940 et 1960 a permis la mise en évidence des risques liés à l'utilisation des pesticides organochlorés (notamment le DDT) : les oiseaux ont ainsi joué le rôle de sentinelles des taux d'organochlorés dans l'environnement. Cette prise de conscience, aidée par la publication du livre *Silent Spring* (« Printemps silencieux ») par Rachel Carson en 1962, a mené à l'interdiction du DDT en 1972 aux Etats-Unis. (Carson, 1962; NRCCAMEH, 1991; Rabinowitz et al., 2009)

Jusqu'aux années 2000, l'utilisation d'arthropodes en tant qu'espèces sentinelles se limitait essentiellement au suivi d'abeilles du genre *Apis* afin d'évaluer la qualité de l'air. Néanmoins, au cours des deux dernières décennies, les recherches sur le potentiel rôle sentinelle des araignées se sont intensifiées en se concentrant principalement sur les araignées vivant dans les zones ripariennes. Comme évoqué précédemment, ces zones de végétation bordant les cours d'eau jouent un rôle essentiel de filtre biologique limitant l'entrée de polluants dans l'écosystème aquatique. Face à la progression de la contamination mondiale de l'eau douce par des polluants

chimiques et au vu des nombreux effets directs et indirects des pesticides sur les araignées, il paraît effectivement judicieux d'étudier le potentiel rôle sentinelle des espèces occupant les zones ripariennes afin d'évaluer et surveiller la pollution environnementale. Les Tetragnathidae sont ainsi les principales araignées étudiées, suivies par les Araneidae, les Lycosidae ou encore les Dolomedidae. (Chumchal et al., 2022; Graf et al., 2019; Malaj et al., 2014; NRCCAMEH, 1991)

b. Surveillance des polluants organiques persistants par les araignées

Les araignées ripariennes sont des sentinelles de la pollution environnementale causée par certains polluants organiques persistants (POP). Les POP, ou PBT organiques, regroupent des pesticides, des produits issus de l'industrie chimique et des polluants émis involontairement lors de combustions industrielles. Alors que la littérature expose l'intérêt des araignées dans la surveillance de ces deux derniers types de POP, aucune étude ne propose à l'heure actuelle leur potentiel rôle sentinelle dans la surveillance de la pollution environnementale causée par des pesticides. Le rôle sentinelle des araignées ripariennes a été proposé pour trois groupes de POP d'intérêt mondial et faisant partie des 12 substances initialement concernées par la Convention de Stockholm : les polychlorobiphényles (PCB, ou biphényles polychlorés), les polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD, ou dioxines) et les polychlorodibenzofuranes (PCDF, ou furanes). (SSC, 2023)

Les PCB sont des produits issus de l'industrie chimique, massivement synthétisés entre les années 1930 et 1970 pour leur utilisation principale en tant qu'isolants électriques. Les PCB sont des substances extrêmement toxiques pour les humains et les animaux, présentant notamment des propriétés reprotoxiques, immunomodulatrices et cancérogènes. Ces polluants particulièrement persistants présentent une importante écotoxicité en s'accumulant dans les organismes animaux, provoquant une bioaccumulation par bioamplification au sein des réseaux trophiques. Les PCB, abondamment présents dans les écosystèmes aquatiques, menacent fortement les poissons et autres organismes aquatiques qui y sont très sensibles. Bien qu'appartenant à l'annexe A de la Convention de Stockholm imposant l'arrêt de leur production et de leur utilisation, les PCB font encore aujourd'hui partie des principaux polluants environnementaux. Dans ce contexte, Kraus et al. (2017) ont mis en évidence que l'évolution sur trois ans des taux de PCB bioaccumulés dans les tissus lipidiques d'araignées ripariennes (Tetragnathidae et Araneidae) était significativement corrélée avec celle des taux mesurés dans des sédiments situés à proximité de leur milieu de vie. Ces résultats, renforcés par d'autres études plus récentes, exposent donc le rôle sentinelle des araignées dans la surveillance spatiale et temporelle des taux de PCB dans les zones ripariennes. (Chumchal et al., 2022; Kraus et al., 2017; SSC, 2024)

Les PCDD et PCDF sont quant à eux des polluants émis involontairement lors de combustions chimiques. Les PCDD peuvent par exemple être émis lors de la

production de molécules pesticides, tandis que les PCDF sont notamment des sous-produits de la synthèse de PCB. Ces substances proches des PCB sont également toxiques pour les humains et les animaux et présentent d'importantes propriétés de bioaccumulation dans les réseaux trophiques et de persistance dans l'environnement. De façon analogue à l'étude détaillée dans le paragraphe précédent, Beaubien et al. (2023) ont prouvé que les Tetragnathidae et Araneidae ripariennes sont des sentinelles adaptées à la surveillance spatiale et temporelle des taux de PCDD et PCDF dans leur environnement. Bien que des espèces d'oiseaux et de poissons soient actuellement utilisées en tant que sentinelles de la pollution des écosystèmes aquatiques par les PCDD et PCDF sur de larges zones géographiques, les araignées ripariennes pourraient compléter cette surveillance en permettant des contrôles bien plus localisés géographiquement. (Beaubien et al., 2023; SSC, 2024)

c. Surveillance des éléments-traces métalliques et du méthylmercure par les araignées

Les éléments-traces métalliques (ETM), ou « métaux lourds », sont des éléments relargués par les activités anthropiques (combustions industrielles, métallurgie, transports...) et par des processus naturels (volcanisme, présence dans la croûte terrestre...). Certains ETM, notamment le mercure, le plomb et le cadmium, sont des substances PBT particulièrement bioaccumulées par les organismes aquatiques, exposant ainsi les êtres humains par voie alimentaire. En Europe, la toxicité importante de ces trois ETM envers les santés humaines et animales a motivé la mise en place de mesures de réduction de leurs émissions et d'amélioration de leur surveillance, en lien avec leur inscription dans la « Liste des substances prioritaires dans le domaine de l'eau » en 2001. (Commissariat général au développement durable, 2019)

En tant qu'espèces prédatrices, les araignées bioaccumulent des ETM. Les types d'ETM bioaccumulés et les conséquences de ces intoxications chroniques varient considérablement selon les familles d'araignées et leurs milieux de vie. Les études portant sur l'établissement du rôle sentinelle des araignées ripariennes dans la surveillance des taux d'ETM dans les écosystèmes aquatiques se concentrent essentiellement sur le mercure (Hg) et sur son principal composé organométallique, le méthylmercure (MeHg). (Todd et al., 2024; Yang et al., 2016)

Suite à son émission principalement anthropique, le Hg inorganique contamine les écosystèmes aquatiques et est converti en MeHg par des micro-organismes sulfato-réducteurs. Le MeHg est la forme la plus toxique du Hg et présente des capacités de bioaccumulation et de bioamplification très importantes, notamment chez les prédateurs des derniers stades du réseau trophique (**Figure 39**). De nombreuses études ont montré que les araignées ripariennes bioaccumulent le Hg et le MeHg dans leurs tissus. Cette bioaccumulation est maximisée chez les araignées de grandes tailles et chez les araignées consommant majoritairement des proies aquatiques

(poissons, insectes...) telles que les araignées semi-aquatiques du genre *Dolomedes* (Dolomedidae) ou les Tetragnathidae. Des études récentes ont pu mettre en évidence que les concentrations en Hg et MeHg dans les tissus des araignées étaient corrélées avec celles retrouvées dans les tissus des poissons et dans les sédiments aquatiques de l'environnement proche du milieu de vie des araignées. Les araignées ripariennes sont donc des espèces sentinelles de la contamination environnementale par le mercure et le méthylmercure. (Chumchal et al., 2022; Drenner et al., 2022; Hannappel et al., 2021; Ortega-Rodriguez et al., 2019; Pennuto & Smith, 2015; Todd et al., 2024)

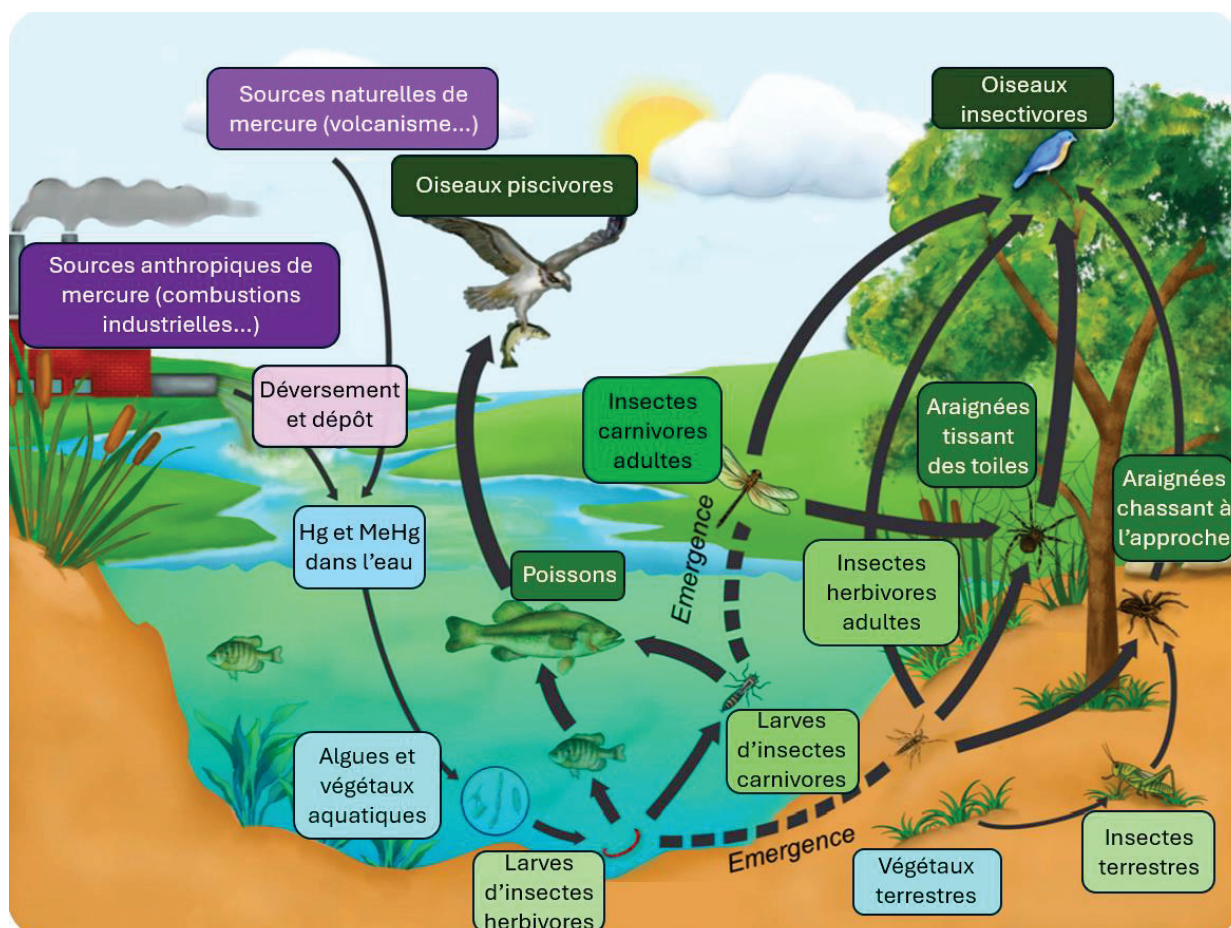


Figure 39 : Bioamplification du mercure et du méthylmercure dans les réseaux trophiques des zones ripariennes

Le mercure inorganique (Hg), principalement relargué par des activités anthropiques, pollue les écosystèmes aquatiques tout autour du globe. Une fois dans l'eau, il peut être transformé en méthylmercure (MeHg) par des micro-organismes sédimentaires. Le Hg et le MeHg sont ensuite bioaccumulés par les organismes vivants tout au long du réseau trophique.

Par bioamplification, les taux de Hg et MeHg dans les tissus des organismes augmentent à chaque étage du réseau trophique (ce phénomène est représenté sur la figure par le gradient de couleur des différentes cases vertes) : les prédateurs sont donc les organismes présentant une bioaccumulation maximale dans l'écosystème.

Au vu de leur position dans le réseau trophique, les araignées ripariennes bioaccumulent le Hg et le MeHg en quantités importantes, justifiant leur intérêt en tant que sentinelles de la pollution environnementale locale par ces polluants métalliques.

(D'après Chumchal et al., 2022)

Au vu de leur bioaccumulation maximale du Hg et du MeHg dans le réseau trophique riparien (**Figure 39**), les oiseaux piscivores et insectivores semblent être des sentinelles plus adaptées que les araignées. Néanmoins, dans une revue de la littérature, Chumchal et al. (2022) précisent l'importance de multiplier le nombre d'espèces sentinelles étudiées car leurs rôles sont complémentaires : les oiseaux permettent une surveillance à large échelle, les poissons assurent la surveillance de la pollution de l'eau à échelle moyenne, les insectes prédateurs (davantage présents en absence de poissons) complètent localement cette surveillance aquatique, tandis que les araignées ripariennes permettent une surveillance très localisée de la pollution environnementale aquatique et terrestre. En parallèle, les auteurs indiquent que les araignées ripariennes pourraient également être utilisées en tant qu'espèces sentinelles des concentrations de sélénium dans les écosystèmes aquatiques. Cet usage semble néanmoins légèrement moins intéressant que pour le Hg et le MeHg, le sélénium étant un ETM bien moins toxique pour les animaux et l'environnement. (Chumchal et al., 2022)

2. Des études sont nécessaires afin d'étendre ce rôle de sentinelle à des araignées vivant dans d'autres milieux, ainsi qu'à la surveillance des pesticides

a. L'utilisation de toiles d'araignées en tant que bioindicateurs de la pollution de l'air

A l'heure actuelle, le rôle d'espèce sentinelle n'a été proposé dans la littérature que pour des araignées ripariennes appartenant principalement à la famille des Tetragnathidae. D'autres familles, occupant des biotopes différents, présentent pourtant des intérêts dans la surveillance des polluants environnementaux.

Les araignées de la famille des Agelenidae présentent par exemple plusieurs particularités intéressantes dans l'étude de la pollution atmosphérique. En vivant toute l'année en milieu urbain, la majorité des Agelenidae sont particulièrement exposées aux polluants d'origine anthropique. De plus, leurs toiles en entonnoir, très larges et denses, ne sont ni recyclées ni détruites et accumulent donc des particules et polluants variés. Suite à une revue de la littérature, Stojanowska et al. (2023) concluent que les toiles des Agelenidae (notamment *Eratigena atrica*) sont des bioindicateurs précis de la qualité de l'air urbain, en captant notamment des polluants toxiques tels que des ETM (plomb, zinc, cuivre, nickel...) ou encore des hydrocarbures aromatiques polycycliques (composés cancérogènes d'origine anthropique). Cette qualité ne correspond pas à une sensibilité particulière des Agelenidae pour les polluants, mais découle simplement de leur mode de vie et des caractéristiques de leurs toiles, limitant leur qualification en tant qu'espèces sentinelles. Néanmoins, les toiles des Agelenidae permettraient un renforcement des dispositifs naturels de surveillance de la qualité de

l'air, principalement centrés à l'heure actuelle sur l'étude des lichens. En présentant une durée de vie plus faible mais une sensibilité plus importante que les lichens, les toiles des Agelenidae seraient ainsi de bons bioindicateurs de la pollution de l'air à court terme, complétant le rôle de bioindicateurs à long terme joué par les lichens. (Rybak, 2015; Stojanowska et al., 2023)

b. Vers l'établissement des araignées en tant qu'espèces sentinelles des taux de pesticides dans l'environnement ?

Parmi les 55 études révisées par Chumchal et al. (2022) portant sur le rôle sentinelle des araignées ripariennes, aucune ne s'était intéressée à la surveillance des pesticides. A la connaissance de l'auteur, ce constat est toujours valable en 2025, même en élargissant la recherche aux araignées vivant dans tous types de milieux.

Au vu des informations regroupées dans ce travail, la recherche du potentiel rôle sentinelle des araignées dans la surveillance des pesticides ne semble pourtant pas incohérente. Tout d'abord, les araignées occupent de très nombreux habitats et sont relativement simples à prélever et étudier. Ensuite, l'exposition orale (par prédation) des araignées aux pesticides a été relevée par de nombreuses études. De plus, les effets sublétaux des pesticides, nombreux et très documentés, seraient relativement faciles à repérer au cours du suivi de populations d'araignées. Enfin, il semblerait que les araignées sont potentiellement capables de bioaccumuler certains insecticides, comme l'ont montré Roodt et al (2023) en observant une bioamplification de néonicotinoïdes (imidaclopride, thiaclopride) chez des Tetragnathidae comparativement aux faibles concentrations présentes dans leur milieu de vie. Cette bioaccumulation pourrait permettre l'estimation des taux de pesticides présents dans un environnement donné.

Malgré ces observations encourageantes, le potentiel rôle sentinelle des araignées dans la surveillance des taux de pesticides environnementaux est néanmoins à nuancer. Au vu des nombreux effets directs des pesticides sur les araignées, il est possible que l'évaluation de leurs quantités dans les tissus des araignées soit limitée par l'action toxique trop importante des pesticides (notamment insecticides). En effet, à l'heure actuelle, les araignées sont des sentinelles de substances qu'elles peuvent bioaccumuler sans subir d'effets toxiques particulièrement marqués : PCB, PCDD, PCDF, Hg, MeHg et sélénium. La bioaccumulation d'insecticides chez les araignées pourrait ainsi être limitée par la manifestation trop rapide d'effets sublétaux et létaux. Cette hypothèse semble moins probable pour les herbicides et fongicides, qui présentent des effets létaux rares et qui pourraient donc potentiellement être bioaccumulés chez les araignées. Bien que les araignées puissent s'exposer aux herbicides et fongicides par voie orale, la bioaccumulation de ces substances dans leurs organismes n'a cependant pas encore été prouvée. Roodt et al (2023) ont même observé l'effet inverse, avec des

concentrations en herbicides et fongicides plus faibles dans les tissus de Tetragnathidae que dans leur milieu de vie.

Finalement, face à ces questionnements, des études restent nécessaires afin d'investiguer le potentiel rôle sentinelle des araignées dans la surveillance de la pollution environnementale par des pesticides. En l'absence de confirmation du rôle sentinelle des araignées, il faudrait néanmoins envisager que les déclins locaux des populations d'araignées pourraient être de bons bioindicateurs de la présence de quantités importantes de pesticides dans leur environnement. Un autre axe de recherche pourrait concerner l'étude des toiles des araignées. A l'image de l'utilisation récente du pain d'abeille (production des abeilles servant à nourrir leurs larves) en tant que bioindicateur de divers pesticides, la soie des araignées vivant dans des milieux pollués pourrait potentiellement contenir des pesticides. Des recherches pourraient ainsi évaluer l'éventuel rôle des toiles d'araignées en tant que bioindicateurs des taux de pesticides environnementaux. (de Oliveira et al., 2016)

III. L'étude des araignées pourrait tisser la voie vers des pratiques agricoles limitant l'utilisation de pesticides particulièrement nocifs pour l'environnement

1. Adapter les pratiques agricoles pour diminuer l'utilisation de pesticides et favoriser l'abondance et la diversité des populations d'araignées

L'exposition des araignées à des quantités trop importantes de pesticides provoque des effets létaux, sublétaux et indirects à l'origine de déséquilibres écosystémiques. Il semble donc essentiel de limiter cette exposition en diminuant autant que possible l'utilisation de produits phytosanitaires, de médicaments antiparasitaires vétérinaires et de produits biocides. Néanmoins, face à la diversité mondiale des cultures, des ravageurs, des parasites, des maladies et des situations socio-économiques, une diminution globale des pesticides au sens large semble illusoire. Il convient donc de rechercher des systèmes agricoles alternatifs adaptés à des situations spécifiques. Cette sous-partie propose ainsi diverses adaptations des protocoles de pulvérisation des pesticides et des pratiques agricoles en vue de favoriser l'activité prédatrice des araignées. Bien que les principes exposés ci-après devraient théoriquement également profiter à d'autres espèces non-cibles, ils ne sont basés que sur l'étude des araignées et nécessiteraient des études plus larges pour être généralisés.

- Adaptation des protocoles de pulvérisation des pesticides

Malgré leurs conséquences écologiques graves, les pesticides sont parfois nécessaires à la survie d'espèces végétales rares ou particulièrement menacées par des ravageurs. Dans de telles situations, il convient alors d'établir un compromis entre le maintien des traitements pesticides et la perte d'araignées : il peut alors être préférable d'altérer temporairement les populations d'araignées plutôt que de perdre la majorité des cultures. En guise d'illustration, Hakeem et al. (2018) suggèrent ainsi que la diminution temporaire de l'abondance des araignées à la suite de l'utilisation d'imidaclopride dans les forêts américaines de conifères du genre *Tsuga* est préférable à la perte de nombreux arbres parasités par des pucerons invasifs (*Adelges tsugae*) et aux déséquilibres écosystémiques massifs que cela causerait à l'échelle de la forêt.

En dehors de ces cas particuliers, une solution consiste en la diminution des doses, fréquences et durées des traitements pesticides afin de limiter leurs effets sur les populations d'araignées. De telles modifications des protocoles de pulvérisation des pesticides seront effectivement à l'origine d'une diminution significative de l'exposition des araignées aux pesticides. Par exemple, la diminution de la pression en fongicides permet une augmentation de l'abondance et de la diversité des araignées dans les vignobles (pour rappel, **Figure 37**). L'adaptation des doses et

fréquences des traitements doit néanmoins prendre en compte les sensibilités variables des diverses familles et espèces d'araignées aux substances actives concernées : par exemple, malgré leur appartenance à la même famille (Linyphiidae), *Gonatium rubens* est deux fois plus sensible à la pulvérisation de glyphosate que *Tenuiphantes tenuis*, avec des effets indirects observés pour des doses respectives de 180 g/ha et 360 g/ha. Enfin, en limitant la superficie des surfaces traitées et en évitant notamment la pulvérisation de pesticides sur les marges des champs, les risques de transport et transfert des substances actives, et donc de contamination de milieux non-cibles, sont diminués. (Haughton, Bell, Boatman, et al., 2001; Reiff et al., 2024)

- Privilégier le désherbage mécanique en remplacement des produits herbicides

Largement employé en agriculture biologique, le désherbage mécanique permet l'élimination des adventices en limitant l'emploi de produits herbicides. Bien que les effets létaux immédiats et indirects à court terme du désherbage mécanique provoquent des chutes des effectifs d'araignées dans les champs, l'absence ou la diminution de l'emploi d'herbicides tels que le glyphosate assure une résilience rapide des populations d'araignées. Dès lors, les effets du désherbage mécanique à long terme sont largement préférables à ceux de l'emploi d'herbicides, notamment par la quasi-absence d'effets sublétaux (**Figure 35**, effets négligeables sur la fécondité). Cette alternative aux herbicides nécessite néanmoins une certaine précaution : une fréquence trop élevée des désherbages mécaniques présente des effets plus importants sur les populations d'araignées que les protocoles usuels de pulvérisations d'herbicides. (Navntoft et al., 2016; Yu et al., 2024)

- Privilégier la présence de prédateurs naturels en remplacement des produits insecticides

Limiter l'utilisation des pesticides favorise la survie et la diversité des prédateurs naturels tels que les araignées. L'augmentation de la pression de prédation sur les ravageurs permet en retour une diminution encore plus importante de l'usage de produits insecticides. Il est également possible de favoriser la présence d'araignées en introduisant des individus d'espèces précises dans les écosystèmes. En effet, la diversité des régimes alimentaires et des méthodes de chasse des araignées implique l'existence probable d'une espèce d'araignée locale particulièrement adaptée à la prédation du ravageur menaçant les cultures à protéger. L'introduction d'individus de cette espèce locale peut ainsi remplir une niche écologique jusque-là peu exploitée, favorisant la prédation des nuisibles en agissant en synergie avec les autres familles d'araignées occupant le milieu. (Marc et al., 1999; Michalko et al., 2019)

Il est néanmoins impératif d'évaluer le potentiel déséquilibre écologique causé par les modifications artificielles des populations d'araignées. L'augmentation de

l'effectif d'une espèce locale ou l'introduction d'une nouvelle espèce dans un milieu peut perturber les réseaux trophiques en place dans l'écosystème. Il est donc essentiel de prendre en compte les interactions éventuelles de l'espèce introduite avec les prédateurs initialement présents. Enfin, des recherches approfondies permettraient l'optimisation du choix de l'espèce de prédateur (araignée ou non) à favoriser dans un écosystème donné. (Michalko et al., 2019)

2. L'utilisation de toxines peptidiques issues de venins d'araignées en tant que bioinsecticides spécifiques

Au-delà des informations recueillies grâce à l'étude des effets des pesticides sur leur biologie et leur rôle écologique, les araignées pourraient elles-mêmes tisser la voie vers l'utilisation de pesticides respectueux de l'environnement.

Afin de réduire l'utilisation des pesticides chimiques usuels qui menacent les santés humaines, animales et environnementales et pour lesquels les ravageurs présentent des résistances de plus en plus préoccupantes, des alternatives biologiques sont recherchées depuis la fin du XX^e siècle. Les bioinsecticides sont des pesticides dont le mécanisme d'action repose sur des éléments naturels, tels que des micro-organismes ou des molécules et protéines d'origine animale ou végétale. La recherche du bioinsecticide idéal s'intéresse à diverses caractéristiques importantes : efficacité, stabilité, spécificité, absence d'effets chez les organismes non-cibles, absence d'effets environnementaux, coût faible, production réalisable à grande échelle... (Monfared et al., 2022; Windley et al., 2012)

L'efficacité de la prédation des araignées sur les insectes est liée à la composition de leur venin. Consistant en un mélange complexe, spécifique à chaque espèce, de centaines voire de milliers de peptides, d'enzymes et de protéines, le venin neurotoxique des araignées représente une immense source potentielle de substances bioinsecticides. En prenant en compte toutes les espèces d'araignées mondiales, Windley et al. (2012) estiment ainsi que plus de 10 millions de peptides différents seraient contenus dans le venin des araignées. Alors qu'à ce jour, seulement 1 576 toxines issues d'un total de 100 espèces ont été analysées sur la base de données ArachnoServer 3.0 (soit seulement 0,015 % de la diversité protéique potentielle), des peptides d'intérêts ont déjà été identifiés. La recherche s'est principalement focalisée sur des espèces mygalomorphes car leur taille et leur longévité en font de meilleures sources potentielles de venin en cas de commercialisation à grande échelle. Des araignées aranéomorphes ont néanmoins occasionnellement été étudiées. (Pineda et al., 2018; Windley et al., 2012)

Les peptides des venins d'araignées présentent des mécanismes d'action très variés et ciblent des sites parfois non exploités par les insecticides classiquement utilisés. De manière générale, ils agissent principalement en perturbant le fonctionnement de canaux ioniques ou de processus biologiques spécifiques aux

insectes. L'immense diversité des toxines peptidiques du venin des araignées permet la recherche de propriétés idéales pour leur utilisation en tant que bioinsecticides. Il est ainsi possible d'identifier des peptides efficaces exclusivement sur les insectes, voire exclusivement sur un ravageur spécifique, tout en ne présentant aucun effet sur les organismes non-cibles (autres arthropodes, oiseaux, poissons, mammifères...). La combinaison des peptides avec des transporteurs membranaires spécifiques peut même augmenter leur létalité envers les ravageurs, ou encore limiter leur action sur les organismes non-cibles tels que les abeilles. (Saez & Herzig, 2019; Windley et al., 2012)

L'utilisation de ces bioinsecticides peut employer diverses voies. Tout d'abord, leur pulvérisation sur les cultures permet l'exposition des ravageurs par voie topique ou éventuellement orale aux toxines neurotoxiques. Il est également théoriquement possible, par transgénèse, de coder ces toxines peptidiques chez des organismes génétiquement modifiés, améliorant par exemple la résistance des végétaux ou la létalité d'entomopathogènes. (Cardoso et al., 2024; Monfared et al., 2022)

En 2014, le premier bioinsecticide composé de toxines de venin d'araignée a été commercialisé. Nommé Spear T, il est constitué de GS- ω /k-HXTX-Hv1a, une neurotoxine contenue dans le venin de l'espèce mygalomorphe *Hadronyche versuta* (Atracidae), permettant le ciblage spécifique d'insectes ravageurs présents dans les cultures réalisées sous serre. Depuis, de nombreuses toxines peptidiques d'intérêt font l'objet d'investigations précises en vue de leur potentielle commercialisation en tant que bioinsecticides, ou même en vue d'un usage médical (antibiotiques, traitements spécifiques de certaines maladies neuromusculaires...). (Cardoso et al., 2024; Monfared et al., 2022; Saez & Herzig, 2019)

Ces progrès novateurs soulignent l'importance des araignées dans le domaine de l'écotoxicologie. Les études actuelles ont pu mettre en évidence les conséquences biologiques et écologiques des pesticides sur les araignées, tout en proposant des solutions alternatives de gestion des systèmes agricoles. La recherche et le développement de bioinsecticides composés de toxines peptidiques issues du venin d'araignées est une perspective encourageante, ouvrant la voie vers une utilisation plus raisonnée des produits phytosanitaires, des médicaments antiparasitaires vétérinaires et des produits biocides à large échelle.

CONCLUSION

Les araignées aranéomorphes, prédateurs essentiels à la régulation des populations d'arthropodes, sont menacées par des activités anthropiques altérant ou détruisant leur milieu de vie. Dans le contexte actuel de pollution environnementale par des pesticides au sens large (produits phytosanitaires, médicaments antiparasitaires vétérinaires, produits biocides), la survie et le rôle écologique des araignées sont compromis. Face à ces enjeux environnementaux, l'objectif de ce travail de thèse était de présenter les nombreux effets des pesticides sur les araignées aranéomorphes à l'échelle des individus, des populations et de l'écosystème.

Bien que principalement exposées de façon passive aux pesticides chimiques ou à leurs résidus présents en quantités importantes dans l'environnement, les araignées s'exposent également de façon active lors de la prédation de proies intoxiquées, contribuant ainsi à la bioamplification de substances persistantes, bioaccumulables et toxiques au sein des réseaux trophiques.

A l'échelle individuelle, les pesticides ont tout d'abord des effets directs sur les araignées. L'effet létal, provoquant la mort des individus intoxiqués, est à distinguer des effets sublétaux. Ces derniers, extrêmement variés, consistent en des modifications comportementales et physiologiques chez les araignées exposées à des doses non létales de pesticides : atteinte de la mobilité, altération de la capacité à tisser des toiles fonctionnelles ou à capturer des proies, diminution de la fécondité des adultes et de la croissance des jeunes... Enfin, en limitant l'abondance de leurs proies et en détruisant leurs habitats, les pesticides ont des effets indirects sur les araignées.

Les nombreux effets directs et indirects des pesticides sur les araignées limitent leur abondance, leur diversité et leur capacité à réguler les populations d'arthropodes, provoquant des déséquilibres à l'échelle de l'écosystème. Alors que le relâchement de la pression de prédation profite aux populations de nuisibles pourtant initialement ciblées par les pesticides, la diminution locale du nombre d'araignées nuit aux populations de leurs prédateurs et pourrait ainsi constituer un des nombreux facteurs à l'origine du déclin mondial des populations d'oiseaux insectivores.

Enfin, les araignées peuvent jouer un rôle important dans la surveillance et la diminution de l'utilisation de substances persistantes, bioaccumulables et toxiques issues d'activités anthropiques (pesticides ou non). Alors que les araignées vivant dans les zones ripariennes jouent le rôle d'espèces sentinelles de la pollution environnementale par des polluants non pesticides, l'étude du venin des araignées a permis la commercialisation de bioinsecticides agricoles extrêmement spécifiques, ouvrant la voie vers l'utilisation de pesticides plus respectueux de l'environnement.

En se basant principalement sur la littérature publiée au cours des 20 dernières années, ce travail propose finalement une actualisation des connaissances concernant l'impact des pesticides sur les araignées aranéomorphes et met en évidence les apports de l'étude des araignées dans la surveillance et la limitation de la pollution environnementale mondiale par des substances persistantes, bioaccumulables et toxiques.

Néanmoins, malgré l'intensification récente de la recherche, de nombreuses zones d'ombres persistent. Tout d'abord, les effets des pesticides varient énormément selon des caractéristiques propres aux substances utilisées ou propres aux araignées exposées. La multiplication des études pourrait ainsi mettre en évidence des pratiques agricoles minimisant les effets des pesticides sur des organismes non-cibles tels que les araignées. Ensuite, en absence d'étude globalisée, l'inquiétant déclin des populations d'araignées causé par l'utilisation de pesticides n'a pour l'instant été observé qu'à des échelles locales. Enfin, la recherche future devrait chercher à étendre le rôle sentinelle des araignées, actuellement restreint à certaines espèces et à quelques polluants non pesticides. L'établissement des araignées en tant qu'espèces sentinelles de la pollution environnementale par des pesticides serait en effet un apport considérable dans le domaine de l'écotoxicologie, tissant la voie vers une utilisation plus raisonnée des pesticides au sens large.

BIBLIOGRAPHIE

- ANMV. (2025). *Index des médicaments vétérinaires autorisés en France*. Consulté le 16 août 2025 à l'adresse <https://www.ircp.anmv.anses.fr/>
- Anses. (2019). *Étude Pesti'home*. <https://www.anses.fr/fr/system/files/2019Pestihome.pdf>
- Anses. (2022, 23 février). *Autorisation de mise sur le marché des médicaments vétérinaires*. Consulté le 12 août 2025 à l'adresse <https://www.anses.fr/fr/content/autorisation-de-mise-sur-le-marche>
- Anses. (2023). *Évaluation des substances actives entrant dans la composition des produits phytopharmaceutiques*. Consulté le 8 août 2025 à l'adresse <https://www.anses.fr/fr/content/evaluation-des-substances-actives-entrant-dans-la-composition-des-produits>
- Anses. (2024). *Glyphosate, le point sur les actions de l'Anses*. Consulté le 20 août 2025 à l'adresse <https://www.anses.fr/fr/content/glyphosate-le-point-sur-les-actions-de-lanses>
- Anses. (2025, 17 janvier). *L'Anses et l'autorisation des produits phytopharmaceutiques en 20 questions*. Consulté le 8 août 2025 à l'adresse <https://www.anses.fr/fr/content/l-Anses-et-l-autorisation-des-produits-phytopharmaceutiques-en-20-questions>
- Article L235 du code rural et de la pêche maritime concernant la mise sur le marché et l'utilisation des produits phytopharmaceutiques (2025). https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006071367/LEGISCTA000006152417/#LEGISCTA000024373528
- Asteraki, E. J., Hanks, C. B., & Clements, R. O. (1992). The impact of the chemical removal of the hedge-base flora on the community structure of carabid beetles (Col., Carabidae) and spiders (Araneae) of the field and hedge bottom. *Journal of Applied Entomology*, 113(1-5), 398-406. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1992.tb00680.x>
- Baćmaga, M., Wyszowska, J., & Kucharski, J. (2024). Environmental Implication of Herbicide Use. *Molecules*, 29(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/molecules29245965>

- Barrantes, G., & Weng, J. L. (2009). Maternal Care and Offspring Behaviour in Three Theridiid Species (Araneae, Theridiidae). *Arachnology*, 14(9), 353-356. <https://doi.org/10.13156/100.014.0902>
- Beaubien, G. B., Olson, C. I., Todd, A. C., & Otter, R. R. (2020). The Spider Exposure Pathway and the Potential Risk to Arachnivorous Birds. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 39(11), 2314-2324. <https://doi.org/10.1002/etc.4848>
- Beaubien, G. B., White, D. P., Walters, D. M., Otter, R. R., Fritz, K., Crone, B., & Mills, M. A. (2023). Riparian Spiders: Sentinels of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxin and Dibenzofuran-Contaminated Sediment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 42(2), 414-420. <https://doi.org/10.1002/etc.5531>
- Bellmann, H. (2014). *Guide photo des araignées et arachnides d'Europe : Plus de 400 espèces illustrées*. Delachaux et Niestlé. ISBN : 978-2-603-01954-2, 429 p.
- Benamú, M. A., Schneider, M. I., & Sánchez, N. E. (2010). Effects of the herbicide glyphosate on biological attributes of *Alpaida veniliae* (Araneae, Araneidae), in laboratory. *Chemosphere*, 78(7), 871-876. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.11.027>
- Bernardes, M. F. F., Pazin, M., Dorta, L. C. P. and D. J., Bernardes, M. F. F., Pazin, M., & Dorta, L. C. P. and D. J. (2015). Impact of Pesticides on Environmental and Human Health. In *Toxicology Studies—Cells, Drugs and Environment*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/59710>
- Bommarco, R., Miranda, F., Bylund, H., & Björkman, C. (2011). Insecticides suppress natural enemies and increase pest damage in cabbage. *Journal of Economic Entomology*, 104(3), 782-791. <https://doi.org/10.1603/ec10444>
- Bounias-Delacour, A. (2014). *Lycosa tarantula*. Consulté le 1er mai 2025 à l'adresse https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/303938
- Bowler, D. E., Heldbjerg, H., Fox, A. D., de Jong, M., & Böhning-Gaese, K. (2019). Long-term declines of European insectivorous bird populations and potential causes. *Conservation Biology*, 33(5), 1120-1130. <https://doi.org/10.1111/cobi.13307>

- Cardoso, P., Pekar, S., Birkhofer, K., Chuang, A., Fukushima, C., Hebets, E., Henaut, Y., Hesselberg, T., Malumbres-Olarte, J., Michálek, O., Michalko, R., Scott, C., Wolff, J., & Mammola, S. (2024). *Ecosystem services provided by spiders*. <https://doi.org/10.22541/au.172538631.11011603/v1>
- Carson, R. (1962). *Silent Spring* (Boston : Houghton Mifflin).
- CCE. (2008). Persistent Bioaccumulative Toxic Substances. *The North American Mosaic: An Overview of Key Environmental Issues*, 47-50.
- Chumchal, M. M., Beaubien, G. B., Drenner, R. W., Hannappel, M. P., Mills, M. A., Olson, C. I., Otter, R. R., Todd, A. C., & Walters, D. M. (2022). Use of Riparian Spiders as Sentinels of Persistent and Bioavailable Chemical Contaminants in Aquatic Ecosystems : A Review. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 41(3), 499-514. <https://doi.org/10.1002/etc.5267>
- Commissariat général au développement durable. (2019, 11 juillet). *Métaux lourds : Cadmium, mercure et plomb*. Consulté le 27 octobre 2025 à l'adresse <https://www.notre-environnement.gouv.fr/>
- Comstock, J. H. (1912). *The spider book : A manual for the study of the spiders and their near relatives, the scorpions, pseudoscorpions, whip-scorpions, harvestmen, and other members of the class Arachnida, found in America north of Mexico, with analytical keys for their classification and popular accounts of their habits*. Doubleday, Page & Co.
- Coots, C., Lambdin, P., Grant, J., & Rhea, R. (2013). Spatial and temporal distribution of residues of imidacloprid and its insecticidal 5-hydroxy and olefin and metabolites in eastern hemlock (Pinales : Pinaceae) in the southern Appalachians. *Journal of Economic Entomology*, 106(6), 2399-2406. <https://doi.org/10.1603/ec13142>
- Décision 2000/817/CE concernant l'interdiction de la substance active perméthrine dans les produits phytosanitaires, 332 OJ L (2000). <http://data.europa.eu/eli/dec/2000/817/oj/fra>
- Deng, L., Dai, J., Cao, H., & Xu, M. (2007). Effects of methamidophos on the predating behavior of *Hylyphantes graminicola* (Sundevall) (Araneae : Linyphiidae).

Environmental Toxicology and Chemistry, 26(3), 478-482. <https://doi.org/10.1897/06-344R.1>

de Oliveira, R. C., Queiroz, S. C. do N., da Luz, C. F. P., Porto, R. S., & Rath, S. (2016). Bee pollen as a bioindicator of environmental pesticide contamination. *Chemosphere*, 163, 525-534. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.022>

Diepens, N. J., Belgers, D., Buijse, L., & Roessink, I. (2023). Pet dogs transfer veterinary medicines to the environment. *Science of The Total Environment*, 858, 159550. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159550>

Direction de l'information légale et administrative. (2025, 12 août). *Loi Duplomb du 11 août 2025 visant à lever les contraintes à l'exercice du métier d'agriculteur*. Consulté le 12 août 2025 à l'adresse <https://www.vie-publique.fr/loi/297070-loi-duplomp-agriculture-pesticides-bassines-11-aout-2025>

Dong, K., Du, Y., Rinkevich, F., Nomura, Y., Xu, P., Wang, L., Silver, K., & Zhorov, B. S. (2014). Molecular biology of insect sodium channels and pyrethroid resistance. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 50, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2014.03.012>

Drenner, R. W., Chumchal, M. M., Gaul, S. P., Hembrough, M. T., Khan, A. M., Rolfe, I. M., Wallace, G. R., & Hannappel, M. P. (2022). Sentinel Riparian Spiders Predict Mercury Contamination of Riverine Fish. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 41(5), 1297-1303. <https://doi.org/10.1002/etc.5307>

ECHA. (2024). *Comprendre le règlement sur les produits biocides*. Consulté le 12 août 2025 à l'adresse <https://echa.europa.eu/fr/regulations/biocidal-products-regulation/understanding-bpr>

ECHA. (2025). *Information on biocides*. Consulté le 16 août 2025 à l'adresse <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals/biocidal-products>

Ecophyto PRO. (2025, janvier). *Le point sur la Loi Labbé et l'Arrêté lieux à usage collectif*. Consulté le 11 août 2025 à l'adresse https://www.ecophyto-pro.fr/fiches/fiche/5/le_point_sur_la_loi_labbe_et_l_arrete_lieux_a_usage_collectif

- Eddleston, M. (2024). Poisoning by pesticides. *Medicine*, 52(6), 390-393.
<https://doi.org/10.1016/j.mpmed.2024.03.011>
- EFSA. (2025, mai 14). *Pesticides* | EFSA. Consulté le 18 juillet 2025 à l'adresse
<https://www.efsa.europa.eu/fr/topics/topic/pesticides>
- Eisoldt, L., Smith, A., & Scheibel, T. (2011). Decoding the secrets of spider silk. *Materials Today*, 14(3), 80-86. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(11\)70057-8](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70057-8)
- E-Phy. (2025). *Le catalogue des produits phytopharmaceutiques autorisés en France*. Consulté le 20 août 2025 à l'adresse <https://ephy.anses.fr/>
- ESCCAP. (2025). *ESCCAP France—Parasitologie vétérinaire—Chien, chat, NAC, cheval*. Consulté le 27 juillet 2025 à l'adresse <https://www.esccap.fr>
- Eyssartier, G., Martiré, D., & Merlier, F. (2021). *L'indispensable guide des araignées de France et autres arachnides*. Humensis. ISBN : 978-2-410-02462-3, 322 p.
- FAO. (2024). *Pesticides use and trade, 1990–2022*.
<https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd1486en>
- FAO, & OMS. (2014). *Code de conduite internationale sur la gestion des pesticides, 4ème version*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ac7ee8c5-40ad-4329-8bb0-4ed241239d88/content>
- FEDIAF. (2025, juin). *European pet population and market data 2023*. Consulté le 29 juillet 2025 à l'adresse <https://europeanpetfood.org/about/statistics/>
- Futura Sciences. (2017). *Griffes d'araignées errantes (Dionycha)*. Consulté le 11 février 2025 à l'adresse <https://www.futura-sciences.com/planete/photos/zoologie-top-15-plus-belles-araignees-693/photos-griffes-araignees-errantes-dionycha-4732/>
- Gabellone, C., Molina, G., Arrighetti, F., Laino, A., & Garcia, C. F. (2022). Behavioral, Histological, and Physiological Evaluation of the Effect of Imidacloprid on the Spider *Misumenops maculissparsus*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 41(9), 2152-2161. <https://doi.org/10.1002/etc.5411>
- Gaver-Wainwright, M. M., Zack, R. S., Foradori, M. J., & Lavine, L. C. (2011). Misdiagnosis of Spider Bites : Bacterial Associates, Mechanical Pathogen Transfer, and Hemolytic

- Potential of Venom From the Hobo Spider, *Tegenaria agrestis* (Araneae: Agelenidae). *Journal of Medical Entomology*, 48(2), 382-388. <https://doi.org/10.1603/ME09224>
- Gavrilescu, M. (2005). Fate of Pesticides in the Environment and its Bioremediation. *Engineering in Life Sciences*, 5(6), 497-526. <https://doi.org/10.1002/elsc.200520098>
- Geller-Grimm, F. (2008). *Sceliphron*. Consulté le 15 mars 2025 à l'adresse https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sceliphron_fg04.jpg
- Godfrey, J. A., Culbertson, K., Archdeacon, M., & Rypstra, A. L. (2024). Herbicide changes the role of body condition in mating interactions of a wolf spider but courtship is primarily affected by female immunity. *Ethology*, 130(8), e13473. <https://doi.org/10.1111/eth.13473>
- Goldsmith, F. B. (1997). [Rev. of *Review of Ecological Census Techniques : A Handbook.*, par W. J. Sutherland]. *Journal of Ecology*, 85(1), 107-107. <https://doi.org/10.2307/2960638>
- Goulson, D. (2013). REVIEW : An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. *Journal of Applied Ecology*, 50(4), 977-987. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12111>
- Graf, N., Battes, K. P., Cimpean, M., Dittrich, P., Entling, M. H., Link, M., Scharmüller, A., Schreiner, V. C., Szöcs, E., & Schäfer, R. B. (2019). Do agricultural pesticides in streams influence riparian spiders? *Science of The Total Environment*, 660, 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.370>
- Greenpeace. (2015, octobre). *Europe's Pesticide Addiction*. https://www.greenpeace.org/static/planet4-international-stateless/2015/10/1a0d04c1-europes-pesticide-addiction.pdf?_gl=1*caja2g*_up*MQ..*_ga*MTEhMDQ5ODk4OS4xNzU0NTA1MjA1*_ga_94MRTN8HG4*czE3NTQ1MDUyMDQkbzEkZzAkDE3NTQ1MDUyMDQkajYwJGwwJGg2NDYxMzg4Nzg
- Guedes, R. N. C., & Cutler, G. C. (2014). Insecticide-induced hormesis and arthropod pest management. *Pest Management Science*, 70(5), 690-697. <https://doi.org/10.1002/ps.3669>

- Hakeem, A., Grant, J. F., Lambdin, P. L., Hale, F. A., Rhea, J. R., Wiggins, G. J., & Coots, C. (2018). Influence of Imidacloprid and Horticultural Oil on Spider Abundance on Eastern Hemlock in the Southern Appalachians. *Environmental Entomology*, 47(4), 951-959. <https://doi.org/10.1093/ee/nvy065>
- Hallmann, C. A., Foppen, R. P. B., van Turnhout, C. A. M., de Kroon, H., & Jongejans, E. (2014). Declines in insectivorous birds are associated with high neonicotinoid concentrations. *Nature*, 511(7509), 341-343. <https://doi.org/10.1038/nature13531>
- Hannappel, M. P., Chumchal, M. M., Drenner, R. W., Kennedy, J. H., Barst, B. D., Castellini, J. M., Nolan, A. R., Willoughby, F. M., & Trauffler, L. P. (2021). Effect of Body Size on Methylmercury Concentrations in Shoreline Spiders : Implications for Their Use as Sentinels. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(4), 1149-1154. <https://doi.org/10.1002/etc.4964>
- Haughton, A. J., Bell, J. R., Boatman, N. D., & Wilcox, A. (2001). The effect of the herbicide glyphosate on non-target spiders : Part II. Indirect effects on *Lepthyphantes tenuis* in field margins. *Pest Management Science*, 57(11), 1037-1042. <https://doi.org/10.1002/ps.389>
- Haughton, A. J., Bell, J. R., Wilcox, A., & Boatman, N. D. (2001). The effect of the herbicide glyphosate on non-target spiders : Part I. Direct effects on *Lepthyphantes tenuis* under laboratory conditions. *Pest Management Science*, 57(11), 1033-1036. <https://doi.org/10.1002/ps.388>
- HealthForAnimals. (2023, mai 16). Global Trends : Parasite Control in Pets. *HealthforAnimals*. Consulté le 29 juillet 2025 à l'adresse <https://healthforanimals.org/animal-health-in-data/parasites-diseases/global-trends-parasite-control-in-pets/>
- Helwig, H. (2012). *Myrmarachne formicaria*. Consulté le 27 avril 2025 à l'adresse https://www.european-arachnology.org/esa/?page_id=2899
- Hénault-Ethier, L. (2016, juin). *Document d'information : Les pyréthrinoïdes, utilisés à la maison, mais non sans dangers*. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2725.0803>

- Howard, R. J., Edgecombe, G. D., Legg, D. A., Pisani, D., & Lozano-Fernandez, J. (2019). Exploring the evolution and terrestrialization of scorpions (Arachnida : Scorpiones) with rocks and clocks. *Organisms Diversity & Evolution*, 19(1), 71-86. <https://doi.org/10.1007/s13127-019-00390-7>
- Huszarik, M., Roodt, A. P., Wernicke, T., Link, M., Lima-Fernandes, E., Åhlén, D., Schreiner, V. C., Schulz, R., Hambäck, P., & Entling, M. H. (2024). Shift in diet composition of a riparian predator along a stream pollution gradient. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 291(2035), 20242104. <https://doi.org/10.1098/rspb.2024.2104>
- Ihara, M., & Matsuda, K. (2018). Neonicotinoids : Molecular mechanisms of action, insights into resistance and impact on pollinators. *Current Opinion in Insect Science*, 30, 86-92. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2018.09.009>
- INPN. (2014a). *Hogna radiata* (Latreille, 1817)—*Lycose tarentuline*. Consulté le 17 avril 2025 à l'adresse https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/233876
- INPN. (2014b). *Latrodectus tredecimguttatus* (Rossi, 1790)—*Malmignatte, Veuve noire méditerranéenne, Veuve noire d'Europe*. Consulté le 20 avril 2025 à l'adresse https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/234104
- INPN. (2023). *Liste rouge des espèces menacées en France*. Consulté le 11 février 2025 à l'adresse https://inpn.mnhn.fr/espece/listerouge/FR/Araignees_metropole_2023
- Insee. (2021). *Définition—Pesticides*. Consulté le 16 juillet 2025 à l'adresse <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2207>
- Islam, F., Wang, J., Farooq, M. A., Khan, M. S. S., Xu, L., Zhu, J., Zhao, M., Muñoz, S., Li, Q. X., & Zhou, W. (2018). Potential impact of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on human and ecosystems. *Environment International*, 111, 332-351. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.10.020>
- Jurgen, O. (2014). *Maratus volans*. Consulté le 27 avril 2025 à l'adresse https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/les-araignees-aussi-font-le-paon_220

- Katagi, T., & Fujisawa, T. (2021). Acute toxicity and metabolism of pesticides in birds. *Journal of Pesticide Science*, 46(4), 305. <https://doi.org/10.1584/jpestics.D21-028>
- Kraus, J. M., Gibson, P. P., Walters, D. M., & Mills, M. A. (2017). Riparian spiders as sentinels of polychlorinated biphenyl contamination across heterogeneous aquatic ecosystems. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 36(5), 1278-1286. <https://doi.org/10.1002/etc.3658>
- Kuephadungphan, W., Petcharad, B., Tasanathai, K., Thanakitpipattana, D., Kobmoo, N., Khonsanit, A., Samson, R. A., & Luangsaard, J. J. (2022). Multi-locus phylogeny unmasks hidden species within the specialised spider-parasitic fungus, *Gibellula* (Hypocreales, Cordycipitaceae) in Thailand. *Studies in Mycology*, 101(1), 245-286. <https://doi.org/10.3114/sim.2022.101.04>
- Laino, A., Romero, S., Cunningham, M., Molina, G., Gabellone, C., Trabalon, M., & Garcia, C. F. (2021). Can Wolf Spider Mothers Detect Insecticides in the Environment? Does the Silk of the Egg-Sac Protect Juveniles from Insecticides? *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(10), 2861-2873. <https://doi.org/10.1002/etc.5157>
- Langenegger, N., Nentwig, W., & Kuhn-Nentwig, L. (2019). Spider Venom : Components, Modes of Action, and Novel Strategies in Transcriptomic and Proteomic Analyses. *Toxins*, 11(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/toxins11100611>
- Li, Y., Miao, R., & Khanna, M. (2020). Neonicotinoids and decline in bird biodiversity in the United States. *Nature Sustainability*, 3(12), 1027-1035. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0582-x>
- Lima, C. M., Uliassi, E., Thoré, E. S. J., Bertram, M. G., Cardoso, L., Cordeiro da Silva, A., Costi, M. P., & de Koning, H. P. (2024). Environmental impacts of drugs against parasitic vector-borne diseases and the need to integrate sustainability into their development and use. *Open Research Europe*, 4, 207. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.18008.2>

- Lopardo, L., Michalik, P., & Hormiga, G. (2022). Take a deep breath... The evolution of the respiratory system of symphytognathoid spiders (Araneae, Araneoidea). *Organisms Diversity & Evolution*, 22(1), 231-263. <https://doi.org/10.1007/s13127-021-00524-w>
- Lopez Vaamonde, C. (2021). *Thomisus onustus jaune*. Consulté le 1er mai 2025 à l'adresse <https://obs37.fr/observatoire/index.php?module=photo&action=taxon&d=araignee&id=1604>
- Mahé, L. (2021). *Saitis barbipes*. Obs'37. Consulté le 26 avril 2025 à l'adresse <https://obs37.fr/observatoire/https%3A%2F%2Fobs37.fr%2Fobservatoire%2Findex.php%3Fmodule%3Dfiche%26action%3Dfiche%26d%3Daraignee%26id%3D2051>
- Malaj, E., von der Ohe, P. C., Grote, M., Kühne, R., Mondy, C. P., Usseglio-Polatera, P., Brack, W., & Schäfer, R. B. (2014). Organic chemicals jeopardize the health of freshwater ecosystems on the continental scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(26), 9549-9554. <https://doi.org/10.1073/pnas.1321082111>
- Mandal, A. H., Sadhu, A., Ghosh, S., Saha, N. C., Mossotto, C., Pastorino, P., Saha, S., & Faggio, C. (2025). Evaluating the impact of neonicotinoids on aquatic non-target species : A comprehensive review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 113, 104606. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2024.104606>
- Marc, P., Canard, A., & Ysnel, F. (1999). Spiders (Araneae) useful for pest limitation and bioindication. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1), 229-273. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00038-9)
- Mayntz, D., Toft, S., & Vollrath, F. (2003). Effects of prey quality and availability on the life history of a trap-building predator. *Oikos*, 101(3), 631-638. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2003.12408.x>
- Michalko, R., Pekár, S., & Entling, M. H. (2019). An updated perspective on spiders as generalist predators in biological control. *Oecologia*, 189(1), 21-36. <https://doi.org/10.1007/s00442-018-4313-1>

- Miller, J. A., Belgers, J. D. M., Beentjes, K. K., Zwakhals, K., & van Helsdingen, P. (2013). Spider hosts (Arachnida, Araneae) and wasp parasitoids (Insecta, Hymenoptera, Ichneumonidae, Ephialtini) matched using DNA barcodes. *Biodiversity Data Journal*, 1, e992. <https://doi.org/10.3897/BDJ.1.e992>
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire. (2024). *Stratégie Ecophyto 2030, révisée en mai 2024*. <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/143166>
- Ministères de l'aménagement du territoire et de la transition écologique. (2025, 24 juin). *Produits biocides*. Consulté le 31 juillet 2025 à l'adresse <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/produits-biocides>
- Mitchell, E. A. D., Mulhauser, B., Mulot, M., Mutabazi, A., Glauser, G., & Aebi, A. (2017). A worldwide survey of neonicotinoids in honey. *Science*, 358(6359), 109-111. <https://doi.org/10.1126/science.aan3684>
- Molina, G., Laino, A., Arrighetti, F., Lacava, M., Romero, S., Mijailovsky, S., & Garcia, C. F. (2023). Effect of the Insecticide Chlorpyrifos on Behavioral and Metabolic Aspects of the Spider *Polybetes pythagoricus*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 42(6), 1293-1308. <https://doi.org/10.1002/etc.5607>
- Monfared, N., Ahadiyat, A., Fathipour, Y., & Mianroodi, R. A. (2022). Evaluation of recombinant toxin JFTX-23, an oral-effective anti-insect peptide from the spider *Selenocosmia jiafu* venom gland proteome. *Toxicon*, 217, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2022.08.003>
- Morley, E. L., & Robert, D. (2018). Electric Fields Elicit Ballooning in Spiders. *Current Biology*, 28(14), 2324-2330.e2. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.05.057>
- Mulder, T., Mortimer, B., & Vollrath, F. (2020). Functional flexibility in a spider's orb web. *Journal of Experimental Biology*, 223(23), jeb234070. <https://doi.org/10.1242/jeb.234070>
- Mullié, W. C., & Everts, J. W. (1991). Uptake and elimination of [¹⁴C]deltamethrin by *Oedothorax apicatus* (Arachnida; Erigonidae) with respect to bioavailability. *Pesticide*

- Biochemistry and Physiology*, 39(1), 27-34. [https://doi.org/10.1016/0048-3575\(91\)90210-D](https://doi.org/10.1016/0048-3575(91)90210-D)
- Natural History Museum Bern. (2025). *World Spider Catalog, Version 26*. Consulté le 16 mars 2025 à l'adresse <https://wsc.nmbe.ch>
- Navntoft, S., Kristensen, K., Johnsen, I., Jensen, A.-M. M., Sigsgaard, L., & Esbjerg, P. (2016). Effects of weed harrowing frequency on beneficial arthropods, plants and crop yield. *Agricultural and Forest Entomology*, 18(1), 59-67. <https://doi.org/10.1111/afe.12134>
- Niedobová, J., Hula, V., & Michalko, R. (2016). Sublethal effect of agronomical surfactants on the spider *Pardosa agrestis*. *Environmental Pollution*, 213, 84-89. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.02.005>
- Niedobová, J., Křištofová, L., Michalko, R., Hula, V., Kýnický, J., & Brtnický, M. (2019). Effects of glufosinate-ammonium herbicide and pod sealant on spider *Pardosa agrestis*. *Journal of Applied Entomology*, 143(3), 196-203. <https://doi.org/10.1111/jen.12574>
- Nieman, C. C., Floate, K. D., Düring, R.-A., Heinrich, A. P., Young, D. K., & Schaefer, D. M. (2018). Eprinomectin from a sustained release formulation adversely affected dung breeding insects. *PloS One*, 13(8), e0201074. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201074>
- NRCCAMEH. (1991). *Animals as Sentinels of Environmental Health Hazards*. National Academies Press (US). <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK234944/>
- Nyffeler, M., & Birkhofer, K. (2017). An estimated 400-800 million tons of prey are annually killed by the global spider community. *Die Naturwissenschaften*, 104(3-4), 30. <https://doi.org/10.1007/s00114-017-1440-1>
- Nyffeler, M., & Bonte, D. (2020). Where Have All the Spiders Gone? Observations of a Dramatic Population Density Decline in the Once Very Abundant Garden Spider, *Araneus diadematus* (Araneae: Araneidae), in the Swiss Midland. *Insects*, 11(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/insects11040248>

- OMS. (2019). *Classification OMS recommandée des pesticides en fonction des dangers qu'ils présentent et lignes directrices pour la classification 2019*. Consulté le 4 août 2025 à l'adresse <https://www.who.int/fr/publications/i/item/9789240005662>
- Ortega-Rodriguez, C. L., Chumchal, M. M., Drenner, R. W., Kennedy, J. H., Nowlin, W. H., Barst, B. D., Polk, D. K., Hall, M. N., Williams, E. B., Lauck, K. C., Santa-Rios, A., & Basu, N. (2019). Relationship Between Methylmercury Contamination and Proportion of Aquatic and Terrestrial Prey in Diets of Shoreline Spiders. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38(11), 2503-2508. <https://doi.org/10.1002/etc.4579>
- Pasquet, A., Nora, T., Mazzia, C., & Capowiez, Y. (2015). Exposure to spinosad affects orb-web spider (*Agalenatea redii*) survival, web construction and prey capture under laboratory conditions. *Journal of Pest Science*, 89. <https://doi.org/10.1007/s10340-015-0691-x>
- Pekár, S. (1999). Foraging mode : A factor affecting the susceptibility of spiders (Araneae) to insecticide applications. *Pesticide Science*, 55(11), 1077-1082. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9063\(199911\)55:11%253C1077::AID-PS55%253E3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9063(199911)55:11%253C1077::AID-PS55%253E3.0.CO;2-T)
- Pekár, S. (2012). Spiders (Araneae) in the pesticide world : An ecotoxicological review. *Pest Management Science*, 68(11), 1438-1446. <https://doi.org/10.1002/ps.3397>
- Pekár, S. (2013). Side Effect of Synthetic Pesticides on Spiders. In *Spider Ecophysiology* (p. 415-427). https://doi.org/10.1007/978-3-642-33989-9_31
- Pekár, S., & Beneš, J. (2008). Aged pesticide residues are detrimental to agrobiont spiders (Araneae). *Journal of Applied Entomology*, 132(8), 614-622. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2008.01294.x>
- Pekár, S., & Haddad, C. R. (2005). Can agrobiont spiders (Araneae) avoid a surface with pesticide residues? *Pest Management Science*, 61(12), 1179-1185. <https://doi.org/10.1002/ps.1110>
- Peng, Y., Shao, X., Hose, G. C., Liu, F., & Chen, J. (2010). Dimethoate, fenvalerate and their mixture affects *Hylyphantes graminicola* (Araneae: Linyphiidae) adults and their

- unexposed offspring. *Agricultural and Forest Entomology*, 12(4), 343-351.
<https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2010.00481.x>
- Pennuto, C. M., & Smith, M. (2015). From Midges to Spiders : Mercury Biotransport in Riparian Zones Near the Buffalo River Area of Concern (AOC), USA. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 95(6), 701-706. <https://doi.org/10.1007/s00128-015-1658-6>
- Perkins, R., Barron, L., Glauser, G., Whitehead, M., Woodward, G., & Goulson, D. (2024). Down-the-drain pathways for fipronil and imidacloprid applied as spot-on parasitocides to dogs : Estimating aquatic pollution. *Science of The Total Environment*, 917, 170175. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170175>
- Petcharad, B., Košulič, O., & Michalko, R. (2018). Insecticides alter prey choice of potential biocontrol agent *Philodromus cespitum* (Araneae, Philodromidae). *Chemosphere*, 202, 491-497. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.134>
- Pineda, S. S., Chaumeil, P.-A., Kunert, A., Kaas, Q., Thang, M. W. C., Le, L., Nuhn, M., Herzig, V., Saez, N. J., Cristofori-Armstrong, B., Anangi, R., Senff, S., Gorse, D., & King, G. F. (2018). ArachnoServer 3.0 : An online resource for automated discovery, analysis and annotation of spider toxins. *Bioinformatics*, 34(6), 1074-1076. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btx661>
- Platnick, N. I., Hormiga, G., Jäger, P., Jocqué, R., Ramírez, M. J., & Raven, R. J. (2021). *Les araignées du monde*. Ulmer. ISBN : 978-2-37922-192-7, 255 p.
- Rabinowitz, P., Scotch, M., & Conti, L. (2009). Human and Animal Sentinels for Shared Health Risks. *Veterinaria italiana*, 45(1), 23-24.
- Ranatunga, M., Kellar, C., & Pettigrove, V. (2023). Toxicological impacts of synthetic pyrethroids on non-target aquatic organisms : A review. *Environmental Advances*, 12, 100388. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100388>
- Règlement (CE) n°1107/2009 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques (2009). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2009/1107/oj/eng>

Règlement d'exécution (UE) 2020/17 portant sur le non-renouvellement de l'approbation de la substance active «chlorpyrifos-méthyl» (2020). [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0017#:~:text=no%20540%2F2011-,En%20annexe%2C%20partie%20A%2C%20du%20r%C3%A8glement%20d'ex%C3%A9cution%20\(,au%20chlorpyrifos%2Dm%C3%A9thyl%20est%20supprim%C3%A9e.&text=Les%20%C3%89tats%20membres%20retirent%20les,tard%20le%2016%20f%C3%A9vrier%202020](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0017#:~:text=no%20540%2F2011-,En%20annexe%2C%20partie%20A%2C%20du%20r%C3%A8glement%20d'ex%C3%A9cution%20(,au%20chlorpyrifos%2Dm%C3%A9thyl%20est%20supprim%C3%A9e.&text=Les%20%C3%89tats%20membres%20retirent%20les,tard%20le%2016%20f%C3%A9vrier%202020).

Règlement (UE) n°546/2011 concernant les principes uniformes d'évaluation et d'autorisation des produits phytopharmaceutiques (2011). <http://data.europa.eu/eli/reg/2011/546/oj/fra>

Reiff, J. M., Hoffmann, C., & Entling, M. H. (2024). Effect of fungicide sprays on spiders in vineyards. *European Journal of Entomology*, 121, 19-28. <https://doi.org/10.14411/eje.2024.003>

Řezáč, M., Gloríková, N., Wilder, S. M., & Heneberg, P. (2021). The sublethal effects of neonicotinoids on spiders are independent of their nutritional status. *Scientific Reports*, 11(1), 8496. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87935-z>

Řezáč, M., Příbáňová, G., Gloríková, N., & Heneberg, P. (2022). Contact exposure to neonicotinoid insecticides temporarily suppresses the locomotor activity of *Pardosa lugubris* agrobiont wolf spiders. *Scientific Reports*, 12(1), 14745. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18842-0>

Rhoades, S. N., & Stoddard, P. K. (2021). Nonlethal Effects of Pesticides on Web-Building Spiders Might Account for Rapid Mosquito Population Rebound after Spray Application. *Applied Sciences*, 11(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/app11041360>

Richardson, J. R., Fitsanakis, V., Westerink, R. H. S., & Kanthasamy, A. G. (2019). Neurotoxicity of pesticides. *Acta Neuropathologica*, 138(3), 343-362. <https://doi.org/10.1007/s00401-019-02033-9>

Rollard, C. (2021). *Fascinantes araignées*. Quae. ISBN : 978-2-7592-3370-0, 163 p.

- Roodt, A. P., Huszarik, M., Entling, M. H., & Schulz, R. (2023). Aquatic-terrestrial transfer of neonicotinoid insecticides in riparian food webs. *Journal of Hazardous Materials*, 455, 131635. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131635>
- Rybak, J. (2015). Accumulation of Major and Trace Elements in Spider Webs. *Water, Air, and Soil Pollution*, 226(4), 105. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2369-7>
- Saez, N. J., & Herzig, V. (2019). Versatile spider venom peptides and their medical and agricultural applications. *Toxicon*, 158, 109-126. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2018.11.298>
- Sam, C., & Bordoni, B. (2023). Physiology, Acetylcholine. In *StatPearls [Internet]*. StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK557825/>
- Samu, F., Matthews, G. A., Lake, D., & Vollrath, F. (1992). Spider webs are efficient collectors of agrochemical spray. *Pesticide Science*, 36(1), 47-51. <https://doi.org/10.1002/ps.2780360108>
- Samu, F., Szita, É., Botos, E., Simon, J., Gallé-Szpisjak, N., & Gallé, R. (2023). Agricultural spider decline : Long-term trends under constant management conditions. *Scientific Reports*, 13(1), 2305. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29003-2>
- Samu, F., & Vollrath, F. (1992). Spider orb web as bioassay for pesticide side effects. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 62(2), 117-124. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.1992.tb00650.x>
- Sánchez-Bayo, F. (2021). Indirect Effect of Pesticides on Insects and Other Arthropods. *Toxics*, 9(8), 177. <https://doi.org/10.3390/toxics9080177>
- Schmidt-Jeffris, R. A., Moretti, E. A., Bergeron, P. E., & Zilnik, G. (2022). Nontarget Impacts of Herbicides on Spiders in Orchards. *Journal of Economic Entomology*, 115(1), 65-73. <https://doi.org/10.1093/jee/toab228>
- SeanMack. (2006). *Spider Wasp dragging Huntsman Spider*. Consulté le 15 mars 2025 à l'adresse https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spider_Wasp_dragging_Hunstman_Spider_SMC.jpg

- Selzer, P. M., & Epe, C. (2021). Antiparasitics in Animal Health : Quo Vadis? *Trends in Parasitology*, 37(1), 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2020.09.004>
- Sentenská, L., Cometa, M., & Pekár, S. (2021). Effect of bio-insecticide residues and the presence of predatory cues on mating in a biocontrol spider. *Chemosphere*, 272, 129647. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129647>
- Seymour, R. S., & Hetz, S. K. (2011). The diving bell and the spider : The physical gill of *Argyroneta aquatica*. *Journal of Experimental Biology*, 214(13), 2175-2181. <https://doi.org/10.1242/jeb.056093>
- Shyamrao, I. D., Raghuraman, M., Kumar, A., & Gajbhiye, R. K. (2022). Evaluation of Safety of Some Insecticides on Predatory Spiders in Rice Ecosystem. *Indian Journal of Entomology*, 84(2), 307-311. <https://doi.org/10.55446/IJE.2021.263>
- SRC, & FAO. (2023, mai). *Rotterdam Convention, revised in 2023*. <https://www.pic.int/Portals/5/download.aspx?e=UNEP-FAO-RC-CONVTEXT-2023.English.pdf>
- SSC. (2023, mai). *Stockholm Convention, revised in 2023*. <https://www.pops.int/Portals/0/download.aspx?e=UNEP-POPS-COP-CONVTEXT-2023.English.pdf>
- SSC. (2024). *Listing of POPs in the Stockholm Convention*. Consulté le 11 août 2025 à l'adresse <https://www.pops.int/TheConvention/ThePOPs/AllPOPs/tabid/2509/Default.aspx>
- Statista. (2024a). *Global pesticide consumption 1990-2022*. Statista. Consulté le 27 juillet 2025 à l'adresse <https://www.statista.com/statistics/1263077/global-pesticide-agricultural-use/>
- Statista. (2024b). *Pesticide consumption worldwide 2022*. Statista. Consulté le 27 juillet 2025 à l'adresse <https://www.statista.com/statistics/1263069/global-pesticide-use-by-country/>

- Stojanowska, A., Zeynalli, F., Wróbel, M., & Rybak, J. (2023). The use of spider webs in the monitoring of air quality—A review. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 19(1), 32-44. <https://doi.org/10.1002/ieam.4607>
- Tassin de Montaigu, C., Glauser, G., Guinchard, S., & Goulson, D. (2025). High prevalence of veterinary drugs in bird's nests. *Science of The Total Environment*, 964, 178439. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178439>
- Tietjen, W. J. (2006). Pesticides affect the mating behavior of *Rabidosia rabida* (Araneae, Lycosidae). *The Journal of arachnology*, 34(2), 285-288. <https://doi.org/10.1636/s04-50.1>
- Todd, A. C., Chumchal, M. M., Drenner, R. W., Allender, C. W., Barst, B. D., Capone, M. T., Degges, A. P., Hannappel, M. P., Perry, C. R., Peterson, R. A., Martinez, T. L., Schmeder, I. E., Williams, T. T., & Willingham, M. G. (2024). Effects of Taxon and Body Size on Mercury Concentrations in Spiders from Two Rivers with Different Levels of Mercury Contamination: Implications for the Use of Riparian Spiders as Sentinels. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 43(10), 2169-2175. <https://doi.org/10.1002/etc.5968>
- Toft, S., & Albo, M. J. (2016). The shield effect: Nuptial gifts protect males against pre-copulatory sexual cannibalism. *Biology Letters*, 12(5), 20151082. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2015.1082>
- Touroult, J. (2014). *Philodromus margaritatus*. Consulté le 1er mai 2025 à l'adresse https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/1679
- Tudi, M., Daniel Ruan, H., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., Chu, C., & Phung, D. T. (2021). Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 1112. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>
- Vidril, F. (2022). *Marpissa muscosa*. Obs'37. Consulté le 26 avril 2025 à l'adresse <https://obs37.fr/observatoire/https%3A%2F%2Fobs37.fr%2Fobservatoire%2Findex.php%3Fmodule%3Dfiche%26action%3Dfiche%26d%3Daraignee%26id%3D2072>

- Vidril, F. (2023). *Thomisus onustus rose*. Obs'37. Consulté le 1er mai 2025 à l'adresse <https://obs37.fr/observatoire/index.php?module=fiche&action=fiche&d=araignee&id=1604>
- Wang, Z., Fu, X., Song, D., & Yan, H. (2006). Effect of low-dose chemical pesticides on distribution and activity of carboxylesterase and acetylcholinesterase in the wolf spider *Pardosa pseudoannulata* (Araneae:Lycosidae). *Kun chong xue bao Acta entomologica Sinica*, 49(2), 260-264.
- Ward, W., Heinly, B., Preston, J., Johnson, C., Sweger, A., & Persons, M. (2022). Lethal and sublethal effects of five common herbicides on the wolf spider, *Pardosa milvina* (Araneae: Lycosidae). *ECOTOXICOLOGY*. <https://doi.org/10.1007/s10646-022-02610-x>
- Wells, C., & Collins, C. M. T. (2022). A rapid evidence assessment of the potential risk to the environment presented by active ingredients in the UK's most commonly sold companion animal parasiticides. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(30), 45070-45088. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20204-2>
- Windley, M. J., Herzig, V., Dziemborowicz, S. A., Hardy, M. C., King, G. F., & Nicholson, G. M. (2012). Spider-venom peptides as bioinsecticides. *Toxins*, 4(3), 191-227. <https://doi.org/10.3390/toxins4030191>
- Wiśniewska, K., Rost-Roszkowska, M., Homa, J., Kasperkiewicz, K., Surmiak-Stalmach, K., Szulińska, E., & Wilczek, G. (2022). The effect of selected immunostimulants on hemocytes of the false black widow *Steatoda grossa* (Theridiidae) spiders under chronic exposition to cadmium. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 252, 109221. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2021.109221>
- Yadav, I. C., & Devi, N. L. (2017). Pesticides Classification and Its Impact on Human and Environment. In *Environmental Science and Engineering: Vol. 6 : Toxicology* (p. 140-158).
- Yang, H., Peng, Y., Tian, J., Wang, J., Hu, J., & Wang, Z. (2016). Spiders as excellent experimental models for investigation of heavy metal impacts on the environment : A

review. *Environmental Earth Sciences*, 75(13), 1059. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5828-6>

Yu, N., Li, J., Chen, Y., Wang, Y., Guo, Z., & Liu, Z. (2024). Glyphosate-based herbicides reduced overwintering population and reproduction of agrobiont spiders. *Journal of Hazardous Materials*, 479, 135782. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135782>

Yu, N., Yang, Z., Fan, Z., & Liu, Z. (2022). Classification and functional characterization of spidroin genes in a wandering spider, *Pardosa pseudoannulata*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 151, 103862. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2022.103862>

Zilnik, G., Bergeron, P. E., Chuang, A., Diepenbrock, L., Hanel, A., Middleton, E., Moretti, E., & Schmidt-Jeffris, R. (2023). Meta-Analysis of Herbicide Non-Target Effects on Pest Natural Enemies. *Insects*, 14(10), 787. <https://doi.org/10.3390/insects14100787>

PESTICIDES AU SENS LARGE : QUELLES CONSEQUENCES SUR LA BIOLOGIE ET LE ROLE ECOLOGIQUE DES ARAIGNEES ARANEOMORPHES ?

Auteur

DENIS Clément

Résumé

L'exposition des araignées aranéomorphes à des pesticides au sens large (produits phytosanitaires, médicaments antiparasitaires vétérinaires, produits biocides) menace leur survie et compromet leur rôle écologique.

Après une présentation générale portant sur les araignées et les pesticides couramment étudiés, ce travail de thèse présente les nombreux effets de ces substances sur les araignées. A l'échelle individuelle, les pesticides ont des effets directs (létaux et sublétaux) et indirects, limitant leur survie et leurs capacités de prédation. La diminution de l'abondance des araignées, la réduction de leur pression de prédation et la bioaccumulation de substances toxiques dans leur organisme provoquent alors des déséquilibres à l'échelle de l'écosystème, avec une croissance des populations de leurs proies et un déclin de celles de leurs prédateurs. Ensuite, l'apport de l'étude des araignées dans la surveillance et la lutte contre la pollution environnementale est exposé. L'établissement d'araignées en tant qu'espèces sentinelles de certaines substances persistantes, bioaccumulables et toxiques permet la surveillance des taux de ces polluants dans l'environnement, tandis que le développement de bioinsecticides constitués de toxines issues de venins d'araignées limite l'utilisation de pesticides chimiques.

Ce travail propose ainsi une actualisation des connaissances concernant l'impact des pesticides sur les araignées aranéomorphes, tout en mettant en évidence les apports de l'étude des araignées dans le domaine de l'écotoxicologie. La poursuite de la recherche pourrait ainsi tisser la voie vers une utilisation plus raisonnée des pesticides au sens large.

Mots-clés

Araneae, Pesticide, Bioaccumulation, Ecotoxicité, Espèce sentinelle

Jury

Président du jury	:	Dr	LEFEBVRE Sébastien
Directeur de thèse	:	Pr	BERNY Philippe
2ème assesseur	:	Pr	ZENNER Lionel