



HAL
open science

Comprendre et aménager la diversité fonctionnelle florale des agrosystèmes pour conserver les insectes pollinisateurs de la parcelle au territoire

Alice Michelot-Antalik

► To cite this version:

Alice Michelot-Antalik. Comprendre et aménager la diversité fonctionnelle florale des agrosystèmes pour conserver les insectes pollinisateurs de la parcelle au territoire. *Ecologie, Environnement*. Université de Lorraine, 2022. tel-03887668

HAL Id: tel-03887668

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03887668>

Submitted on 6 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université de Lorraine
Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires
Laboratoire Agronomie et Environnement Nancy-Colmar
UMR 1121 UL/INRAE

Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie des Ressources Naturelles

Habilitation à Diriger des Recherches

**Comprendre et aménager la diversité fonctionnelle florale des agrosystèmes
pour conserver les insectes pollinisateurs de la parcelle au territoire**

Présentée par
Alice MICHELOT-ANTALIK

Soutenance le 16 novembre 2022

Membres du jury

Rapporteurs :

Laure Barthes, Maître de conférences HDR, Université Paris-Saclay
Pascal Carrère, Ingénieur de recherche HDR, INRAE
Elena Kazakou, Professeure, Institut Agro Montpellier SupAgro

Examineurs :

Isabelle Dajoz, Professeure, Université de Paris
Emmanuelle Porcher, Professeure, Museum d'Histoire Naturelle
Christophe Robin, Directeur de recherche, INRAE

Parrain HDR :

Sylvain Plantureux, Professeur, Université de Lorraine

Remerciements

Voici donc le temps venu d'écrire la partie la plus importante de cette HDR. La rédaction de ce manuscrit a été l'occasion de me replonger dans mon parcours professionnel et mes expériences de recherche. Une évidence est que ce parcours a été jalonné de rencontres enrichissantes sous une bonne étoile. Je conçois la recherche comme une aventure scientifique et humaine avant tout. J'ai eu la chance d'être imprégnée par la recherche assez jeune ayant des parents aux métiers scientifiques, à qui je rends hommage. Ma mère Marie-Elise Gernez qui a rédigé une thèse sur « La Spermatogénèse chez deux espèces de Bryophytes : le *Marchantia polymorpha* et le *Mnium undulatum* : étude ultrastructurale et cytochimique » à l'Université Pierre et Marie Curie en 1981 et mon père Jean-Luc Michelot sur « L'Évolution temporelle des teneurs en isotopes stables et en tritium des eaux du tunnel du Mont-Blanc : estimation des paramètres hydrauliques à l'échelle d'un massif cristallin » à l'Université Paris-sud en 1982. Conséquence directe, j'ai grandi dans un environnement ressourçant et inspiré par la nature à quelques kilomètres de l'Université Paris-sud. Ces derniers mois, j'ai pris conscience que ce que j'ai appris à l'Université a forgé une grande part de ma culture scientifique et de ma passion pour l'écologie. Je remercie pour cela mes professeurs inspirants qui m'ont montré la voie de l'écologie et ont marqué ces années du Deug au master : Pierre-Henri Gouyon, Paul Leadley, Jane Lecomte, Sophie Nadot...

Je remercie ma directrice de thèse Claire Damesin sans qui cette aventure n'aurait pas commencé. Quelle chance d'avoir croisé ta route dès 2004 en stage de Deug. Merci de m'avoir transmis ta passion pour la recherche avec tant d'humanité et d'être toujours de bons conseils. Je remercie mes tuteurs d'enseignement à l'Université Paris-sud : Jean-Christophe Lata et Damien Banas qui m'ont beaucoup appris également. Merci à tous les collègues du laboratoire ESE que j'ai côtoyés pendant toutes ces années.

A la suite de ma thèse, j'ai souhaité me préoccuper davantage de la transmission de la recherche vers la gestion forestière. Là aussi j'ai rencontré des personnes incroyables : Patrizia, Marjorie, Daphnée, Viviane, Marie-Hélène... merci pour cette ambiance familiale au GIP ECOFOR pendant un an et demi et les séjours en dehors. Ce temps passé au GIP ECOFOR m'a permis de mûrir mes projets de recherche et de croiser la route de Sophie Gachet qui m'a montré la voie des traits ! Merci Sophie pour tout ce que tu m'as appris, ton accueil à Marseille et nos précieux échanges entre art, sport et écologie. Merci aussi à Myriam Legay pour son investissement dans les projets sur l'adaptation au changement climatique et nos échanges.

Depuis 2013, j'ai intégré le LAE. Arrivée écophysiologiste forestière je me suis convertie à l'agroécologie des prairies. Encore une rencontre importante en la personne de Sylvain Plantureux, mon parrain d'HDR. Sylvain tu as su partager ton expérience, m'accompagner sur certains projets et je crois aussi partager un grand nombre de valeurs communes ce qui nous as souvent fait échanger de façon constructive, merci. Je remercie également mon amie Nadia Michel qui a été un fil rouge tout au long de ces années. Nos moments partagés en dehors du bureau sont toujours très agréables et nos collaborations complémentaires sur l'étude des pollinisateurs. Je remercie Christophe Robin, directeur du LAE, pour la confiance qu'il m'a accordée et qui m'a permis de trouver davantage ma place dans le collectif et d'assumer des responsabilités. Sylvain et Christophe je vous souhaite de belles retraites même si c'est à regret que je vous vois partir. Merci à Olivier Théron pour son écoute, sa haute pertinence scientifique et ses propositions de collaborations. Le cadre conceptuel des services écosystémiques et l'échelle territoriale me paraissent moins loin et c'est clairement grâce à toi. Merci à Alan Kergunteuil pour les projets co-encadrés, ce fût un plaisir de travailler avec toi et de découvrir tes nombreux talents (notamment statistiques !) Je te souhaite le meilleur pour la suite. Je remercie tous les collègues du LAE que ce soit en enseignement et en recherche pour nos échanges. Je tiens à remercier particulièrement tous les jeunes scientifiques que j'ai pu encadrés pour leur importante

contribution : les stagiaires, ingénieurs d'étude et doctorants. C'est quelque chose de très stimulant et je me sens toujours plus vivante dans mes activités d'encadrement. Un remerciement particulier à Jérémie Goulnik, mon premier doctorant. Cette expérience partagée sur les traits m'a beaucoup apportée et fait avancer aussi. Merci à toute l'équipe technique du LAE pour leur soutien à mes expérimentations (David, Claude, Jodie, Aude, Jérémy, Hélène et Clément) et aux tâches administratives (Thamara et Julie).

Je tiens à remercier Guido Rychen, directeur de l'ENSAIA et Alain Hehn, futur directeur du LAE pour leurs soutiens. A l'ENSAIA, j'ai beaucoup apprécié le partage de projets et d'enseignements avec les collègues de l'URAFPA : Sylvain Lerch (maintenant en Suisse), Stefan Jurjanz, Claire Collas, Agnès Fournier et du LSE : Geoffroy Séré, Catherine Sirguy et Apolline Auclerc. Merci également à tous les membres fondateurs de Spigest et en particulier Paul Montagne pour son aide en botanique et son activité pour l'association, Laurence Wieser pour son engagement sur la ville de Laxou (les premiers projets) et Mitra Tehranchi mon ancienne stagiaire de M2. J'ai également une pensée pour mes collègues de la faculté des sciences et en particulier pour Bernard Amiaud qui nous a quittés.

Merci à tous les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon HDR.

Un grand merci à tous les partenaires de projets avec qui j'ai eu plaisir à avancer. Anne Farruggia et Jean-François Odoux que j'ai rencontrés lors de mon premier projet « pollinisateurs ». Le groupe « prairie » qui m'a accueillie avec l'énergie communicative d'Anne Bonis malgré la crise Covid (les échanges de colis et les démonstrations de protocoles en visio) et les discussions autour des pizzas parisiennes avec Servane Lemauiel-Lavenant, Grégory Loucougaray, Didier Alard et Olivier Chabrierie. Les partenaires locaux du CEN, du Pôle lorrain du futur Conservatoire Botanique National Nord-Est, de la ville de Nancy (merci à Loïc Delagneau pour son engagement dans les projets biodiversité), de la métropole de Nancy, également Anne Vallet qui m'a beaucoup appris sur l'entomologie avec bonne humeur et accompagnée pour de multiples projets et Thomas Lecocq. Merci à Simon Taugourdeau et Pascal Carrère pour le projet PESI et leur partage d'expériences sur la multifonctionnalité des prairies.

Une mention spéciale au GDR Pollineco et aux rencontres que j'ai pu y faire. Cela m'a beaucoup apporté et je souhaite longue vie au GDR, coordonné par Bertrand Schatz. Trois personnes en particulier ont grandement participé à mon épanouissement professionnel ces derniers temps et ont représenté pour moi la petite lumière au bout du tunnel. Mathilde Baude, Emmanuelle Porcher et Isabelle Dajoz. Merci pour la confiance que vous m'avez accordée, votre générosité, votre grande compétence scientifique et votre humilité : vous me montrez la voie à suivre.

Enfin, je souhaite remercier l'ensemble de mes proches. Tous mes amis pour leur soutien avec une pensée spéciale pour ma soeur Estelle qui nous a quittés bien trop vite. Ma famille qui compte énormément et contribue à mon équilibre de vie : mes parents, mes beaux-parents, mes cinq frères et sœurs et ma grand-mère en particulier. Merci à toi Michel pour ton soutien indéfectible, ta patience et ta bienveillance au quotidien. Merci à mes enfants Lucie et Gaël qui m'apportent tant de bonheur chaque jour et font de moi une maman épanouie. Je sais qu'il n'est pas toujours facile de me suivre dans mes aventures d'enseignante-chercheuse. Je vous dédie à tous les trois ce manuscrit d'HDR.

Merci à mon père qui m'a transmis, sans le vouloir, sa passion pour la recherche et pour qui je serai allée au bout de cette HDR malgré la tristesse de sa disparition.

Et puisque la musique m'a accompagnée tout au long de cette rédaction, je finirais par cette citation de Grand Corps Malade :

« Puisque mon temps est limité, mes choix doivent être à la hauteur
C'est une course contre la montre ou une course contre la peur
C'est toujours la même chevauchée, on vise la lueur droit devant
Même si cette quête est insensée, je cours pour me sentir vivant ».

Glossaire des abréviations utilisées pour les structures de recherche collaboratives

ABSys : Agrosystèmes biodiversifiés (Montpellier)

Agroscope : Centre de compétences de la Confédération pour la recherche agricole (Posieux, Suisse)

ASTER : Département ACT Sciences pour l'action, les transitions, les territoires (Mirecourt)

CEFE : Centre d'Écologie Fonctionnelle et Evolutive (Montpellier)

CESCO : Centre d'Écologie et des Sciences de la Conservation (Paris)

CNPF : Centre National de la Propriété Forestière (Paris)

DSLPL : Unité expérimentale de l'INRAE de Saint-Laurent-de-la-prée (Saint-Laurent-de-la-prée)

EDYSAN : Écologie et Dynamique des Systèmes Anthropisés (Amiens)

EPGV : Etude des Polymorphismes des Génomes Végétaux (Evry)

ESE : Ecologie Systématique et Evolution (Orsay)

EVA : Écophysiologie Végétale, Agronomie et nutritions (Caen)

GEOLAB : Laboratoire de Géographie Physique et Environnementale (Clermont-Ferrand)

GIP ECOFOR : Groupement d'Intérêt Public Ecosystèmes Forestiers (Paris)

IEES : Institut d'Écologie et des Sciences de l'Environnement (Paris)

IMBE : Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale (Marseille)

LSCE : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (Saclay)

LSE : Laboratoire Sols et Environnement (Vandœuvre-lès-Nancy)

MECADEV : Mécanismes adaptatifs et Evolution (Brunoy)

ONF : Office Nationale des Forêts (Nancy)

SELMET : Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux (Montpellier)

UC Louvain : Université Catholique de Louvain (Louvain-la-Neuve, Belgique)

URAFPA : Unité de Recherche Animal et Fonctionnalités des Produits Animaux (Vandœuvre-lès-Nancy)

Résumé

La transition agroécologique des systèmes agricoles nécessite la mise en place d'écosystèmes diversifiés favorisant les régulations biologiques. Parmi elles, la pollinisation entomophile assure la reproduction de la majorité des plantes à fleurs et une stabilisation des rendements des cultures. Pour enrayer le déclin des insectes pollinisateurs, les paysages agricoles pourraient fournir des ressources florales diversifiées et continues et des habitats favorables à ces pollinisateurs comme les prairies permanentes. Mon projet de recherche a ainsi pour objectifs de comprendre et quantifier la diversité fonctionnelle florale, de favoriser une gestion sans pesticide et résiliente au changement climatique et d'évaluer la pollinisation de la parcelle au territoire agricole. Il s'inscrit dans la continuité de mes activités les plus récentes et s'appuie sur mes compétences en écophysiologie végétale, en écologie des communautés, en agroécologie et en écologie de la restauration. Mes futures recherches seront axées sur l'observation de mécanismes fonctionnels à partir d'expérimentations *in* et *ex situ* et le renforcement des liens entre mes travaux et la gestion des écosystèmes afin de favoriser l'appropriation des concepts d'écologie fonctionnelle par les gestionnaires.

Sommaire

I. CURRICULUM VITAE	1
II. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT	3
1. BILAN DES ACTIVITES.....	3
2. RESPONSABILITES EN ENSEIGNEMENT	6
III. ACTIVITES DE RECHERCHE	7
1. PROJETS DE RECHERCHE	7
2. ENCADREMENT DE LA RECHERCHE.....	8
3. EXPERTISE SCIENTIFIQUE	11
4. VULGARISATION SCIENTIFIQUE	11
5. RESPONSABILITES ADMINISTRATIVES	12
6. PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES.....	12
IV. BILAN DES ACTIVITES DE RECHERCHE	20
1. EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ESSENCES FORESTIERES	21
1.1. Contexte.....	21
1.2. Démarche scientifique	22
1.3. Réponse climatique interannuelle de la croissance et du $\delta^{13}C$: approches dendrochronologique et paléoclimatique	23
1.4. Suivi de la croissance radiale intra-annuelle : approches anatomique et biochimique	24
1.5. Etude du $\delta^{13}C$ intra-cerne de trois essences : approche physiologique et modélisation mécaniste.....	24
1.6. Post-doctorat : compréhension fonctionnelle du dépérissement des hêtres	25
1.7. Adaptation des forêts au changement climatique.....	27
2. EVALUATION MULTI-SERVICES DES PRAIRIES	29
2.1. Contexte.....	31
2.2. Démarche scientifique	32
2.3. Effets des pratiques de gestion sur la diversité des communautés végétales.....	36
2.4. Relations entre diversité végétale et biens ou services écosystémiques.....	38
3. ETUDE FONCTIONNELLE DES INTERACTIONS PLANTES-POLLINISATEURS	50
3.1 Contexte.....	50
3.2. Effet des pratiques de gestion sur la diversité des plantes et les traits floraux à l'échelle des communautés.....	53
3.3. Effet des pratiques de gestion sur la diversité et l'abondance des pollinisateurs	56
3.4. Relations entre la diversité des plantes et la diversité et l'abondance des pollinisateurs.....	59
3.5. Relations entre la diversité et l'abondance des pollinisateurs et la pollinisation.....	67
4. RESTAURATION ECOLOGIQUE PAR L'IMPLANTATION D'ESPECES PRAIRIALES ET VALORISATION DE LA BIOMASSE	72
4.1. Contexte.....	72
4.2. Démarche scientifique	73
4.3. Effets de la compétition des espèces prairiales sur la croissance de la Renouée du Japon.....	74
4.4. Valorisation de la biomasse fourragère dans les projets de restauration écologique	79
V. PROJET DE RECHERCHE	83
1. COMPRENDRE ET QUANTIFIER LA DIVERSITE FONCTIONNELLE FLORALE POUR CONSERVER LES INSECTES POLLINISATEURS.....	85
1.1. Quantifier la diversité fonctionnelle florale des espèces végétales	85
1.2. Analyse des relations entre diversité florale et diversité des pollinisateurs à l'échelle des communautés.....	87
2. FAVORISER UNE GESTION SANS PESTICIDE ET RESILIENTE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE PAR L'AMENAGEMENT DES ECOSYSTEMES	91
2.1. Appliquer les observations fonctionnelles à la gestion et à la restauration des prairies	91
2.2. Aménager les agrosystèmes pour conserver les insectes pollinisateurs	94
2.3. Aménager les espaces verts urbains pour conserver les insectes pollinisateurs.....	97
2.4. Lutte écologique contre les espèces invasives par compétition végétale	100
3. EVALUER LE SERVICE DE POLLINISATION DE LA PARCELLE AU TERRITOIRE AGRICOLE	101
3.1. Quantifier la pollinisation à l'échelle des territoires	101
3.2. Valider les indicateurs à l'échelle du territoire par des données expérimentales	103
3.3. Relier service de pollinisation et service de régulation des ravageurs	104
VI. CONCLUSION	106
VII. BIBLIOGRAPHIE	107

I. Curriculum vitae

Alice MICHELOT-ANTALIK,
Docteure en Ecologie végétale, Maître de conférences, section 68

38 ans, née le 14/03/1984
Mariée, 2 enfants, nationalité française
Permis B

1. Expérience professionnelle

- Depuis sept. 2013** **Maître de conférences à l'Université de Lorraine (ENSAIA)**
Laboratoire Agronomie et Environnement Nancy-Colmar UMR 1121
Université de Lorraine - INRAE, section 68
Agroécologie, communautés prairiales, pollinisation
- 2012-2013** **Chargée de mission au GIP Ecofor**, projets R&D Traitaut et Sicfor
Du suivi aux indicateurs de changement climatique en forêt
Traits fonctionnels et autécologie des essences forestières
- Sept.-nov. 2011** **Post-doctorat CNRS au laboratoire Ecologie Systématique et Evolution (ESE)**, Université Paris-Sud
Fonctionnement et allocation du carbone des hêtres dépérissants
- 2007-2011** **Projet de recherche en Ecophysiologie végétale au laboratoire ESE**
Projet Afoclim (GIS climat environnement)
Réponse de 3 espèces forestières (Hêtre, Chêne, Pin) au changement climatique - expérimentation et modélisation
- 2007-2011** **Monitrice et ATER en Biologie à l'Université Paris-Sud**
Enseignement en L1, L3 et M1 (**300 h**)
Ecologie, écophysiologie végétale, botanique, pédologie
- 2004-2006** **4 stages de recherche (L2, L3, M1 et M2) au laboratoire ESE**
Inventaires, flux et stocks de carbone et d'eau d'une chênaie-charmaie
Impact en milieu aquatique d'une espèce invasive animale

2. Cours universitaire

- 2007-2011** **Doctorat en Ecophysiologie végétale**, Université Paris-Sud, ESE
Croissance et $\delta^{13}\text{C}$ des cernes de trois essences forestières tempérées (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* et *Pinus sylvestris*) face aux variations climatiques à l'échelle interannuelle et saisonnière
soutenue le 1er juillet 2011
Directeurs : Claire Damesin et Eric Dufrêne
Financement : Bourse ministérielle MENRT, Mention Très Honorable

- 2005-2007** **Master Recherche Ecologie Biodiversité et Evolution**
UPS, UPMC, AgroParisTech, ENS
Mention Bien, parcours **Communautés, écosystèmes, changements globaux**
- 2004-2005** **Licence Biologie des organismes**, UPS, Mention AB (6/115)
- 2002-2004** **Deug Sciences de la Vie**, UPS, mention Bien

II. Activités d'enseignement

1. Bilan des activités

Mes premières activités d'enseignement ont commencé lors de mon doctorat en tant que monitrice (208 h éq. TD) puis ATER (97 h éq. TD) à l'Université Paris-Sud. J'ai enseigné à différents niveaux : L1, L3 et M1 et dans différentes thématiques de l'écologie : **écologie évolutive** (approches phylogénétiques), **écotoxicologie aquatique**, **écologie fonctionnelle forestière et botanique**. Plus particulièrement, les TP d'écotoxicologie aquatique consistaient à mesurer la qualité de l'eau par des analyses physico-chimiques et la biodiversité de la microfaune benthique. Pour les écosystèmes forestiers, j'ai encadré plusieurs projets de diagnostic d'état et de fonctionnement écologique d'une aulnaie humide et de différentes parcelles en forêt de Paimpont. J'ai également enseigné les processus fonctionnels du continuum sol-plante et transmis mes connaissances naturalistes sur la reconnaissance botanique des espèces végétales aussi bien ligneuses qu'herbacées et leurs usages agronomiques.

Depuis mon affectation en 2013 en tant que maître de conférences à l'Université de Lorraine (ENSAIA), j'ai transmis mes connaissances en **écophysiologie végétale** et en **agroécologie** aux étudiants de différents niveaux et développé un enseignement en **agronomie** et **écologie** en lien avec mes activités de recherche sur les prairies. Je réalise des CM, TD, TP, jurys et j'encadre des projets à l'ENSAIA en 1ère année, 2ème année et 3ème année (spécialisations Agricultures et Développement des Territoires, et Développement Durable des filières agricoles) dans le service « Sciences végétales » ainsi qu'en M2 du master Agrosociologie, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt (AETPF, Nancy). La répartition de l'ensemble de mes enseignements est présentée en **Figure 1**. J'ai réalisé en moyenne **215 h éq. TD** par an. Le détail de mes enseignements actuel est récapitulé dans le **Tableau 1**.

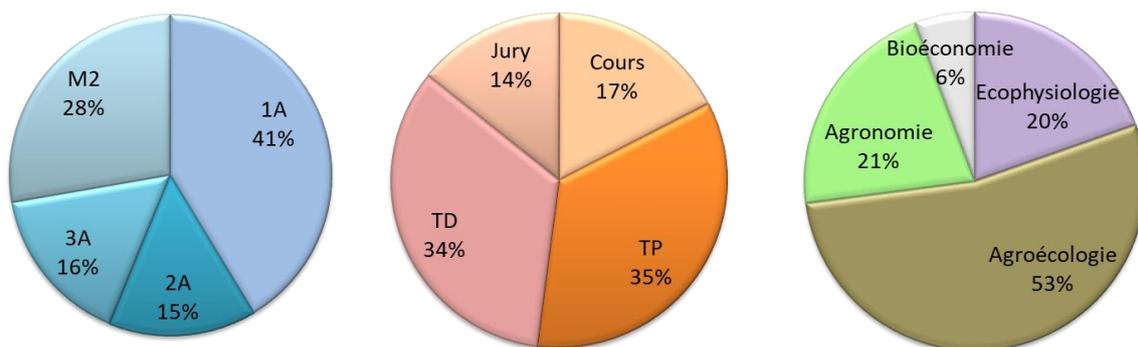


Figure 1. Répartition moyenne des heures d'enseignement de 2013 à 2021 par niveau de formation (à gauche), type d'enseignement (au milieu) et discipline (à droite). Les pourcentages d'heures équivalent TD correspondants sont donnés.

Dans la création de mes enseignements, **je combine différentes approches pour apporter des visions complémentaires aux étudiants**. Par exemple, les modules de M2 que je coordonne (agroforesterie et écologie prairiale) sont constitués d'une partie théorique basée sur les fondamentaux des principes d'écologie, une approche expérimentale *in-situ*, une analyse statistique des données mesurées sur le terrain, une sortie axée sur la gestion conservatoire et des interventions de professionnels. **J'accompagne des projets expérimentaux** en

biométrie où les étudiants de 3^{ème} année ENSAIA construisent un protocole à partir d'un questionnaire scientifique. Ils restituent toute leur démarche scientifique sous la forme d'un article et d'un exposé oral. Dans le module d'introduction en écologie que j'ai mis en place en 1^{ère} année ENSAIA ainsi que dans le module biodiversité et gestion des écosystèmes en 3^{ème} année ENSAIA et en M2, **les étudiants approfondissent les liens entre structure des écosystèmes et services écosystémiques**. Ils choisissent des sujets en écologie qui leur permettent de reconstituer leurs écosystèmes (compartiment, composante, interactions) et de replacer les facteurs environnementaux et anthropiques qui influencent le fonctionnement de ces écosystèmes. En 3^{ème} année et en M2, la notion de service écosystémique est approfondie pour que les étudiants s'approprient les typologies utilisées et comprennent les liens entre conservation et services. Concernant les sorties que je réalise, elles visent à **développer les compétences botaniques des étudiants** sur la reconnaissance des espèces prairiales (notamment les Poacées), aussi bien au stade végétatif qu'au stade reproductif, et des adventices au stade plantule. Mes compétences acquises en doctorat en **écophysiologie végétale** m'ont permis de développer la moitié des enseignements de ce module en 1^{ère} année ENSAIA. J'y associe une approche théorique (sous forme de cours magistral, d'exercices de TD et de réalisation d'un poster à partir d'un article scientifique) avec une approche pratique. Cette dernière est **une analyse de croissance effectuée par les étudiants à partir de plantes que je fais pousser en phytotrons dans différentes conditions environnementales**. En agronomie, j'ai participé au module d'analyse des exploitations agricoles qui consiste à accompagner un groupe d'étudiants dans l'établissement d'un diagnostic de l'exploitation qu'ils visitent. Ce diagnostic se fait à partir d'une **analyse technico-économique, financière et environnementale des différents ateliers de l'entreprise agricole**. J'enseigne également quelques heures sur la **gestion des systèmes fourragers** (principalement sur les prairies permanentes).

Consciente qu'il faut faire évoluer nos méthodes d'enseignement pour maintenir un bon niveau d'apprentissage des connaissances et stimuler l'intérêt de nos étudiants, je participe à la commission « pédagogie numérique » de l'ENSAIA (devenue commission d'innovation pédagogique depuis 2022). En termes d'innovation pédagogique, depuis décembre 2021, nous avons mis en place la fresque de la biodiversité en 2^{ème} année ENSAIA dans le module bioéconomie. Cette fresque permet aux étudiants de replacer eux-mêmes les liens entre les enjeux autour de la biodiversité, les déterminants, les services écosystémiques et les impacts du déclin de la biodiversité. En 2015-2016, j'ai participé à la construction d'un **module d'e-learning de 180 h portant sur l'Agroécologie pour la production animale et fourragère** (AGRAF) dans le cadre d'un projet ANR UTOP (Université de technologie ouverte pluripartenaire). Bernard Amiaud et moi avons coordonné le module 2 « Ecologie prairiale ». Les modules produits dans AGRAF sont destinés à la fois à la formation initiale supérieure (niveau master, ingénieur, doctorat) et à la formation continue (ingénieurs, chercheurs, enseignants et techniciens supérieurs). Les partenaires qui ont constitué ces modules d'enseignement sont nombreux : Université de Lorraine, UNIT (expertise enseignement à distance), INRIA (création Mooc), Inra, Cirad, AgroParisTech, Agrocampus Ouest, Montpellier SupAgro, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, AgroSup Dijon et Bordeaux Sciences Agro et VetSup Agro Lyon-Clermont-Ferrand. Ce projet m'a permis **de mobiliser des connaissances de recherche pour la pédagogie numérique** et constitue une expérience solide dans mon métier d'enseignante-chercheuse.

Tableau 1. Récapitulatif des enseignements réalisés actuellement.

Module	Année	Type	Thème	Volume horaire (ETD)	Responsable du module
Biométrie DEFI	3A DEFI	TD	Projet expérimental	15	Yves Le Roux (URAFPA)
Biodiversité et gestion des écosystèmes	3A ADT	CM	Conservation de la biodiversité et services écosystémiques	5.25	Agnès Fournier (URAFPA)
		TD	Exposés services écosystémiques	2	
Projet biodiversité vergers Sion	3A ADT et DEFI	TP	Botanique des vergers de la colline de Sion	12	Nadia Michel (LAE)
Eau dans les agrosystèmes	2A	CM	L'eau dans la plante	2.25	Geoffroy Séré (LSE)
		TD	Adaptations des plantes au stress hydrique	6	
		Jury	Exposés	6	
Services écosystémiques	2A	CM	Services écosystémiques dans les agrosystèmes	2.25	Guillaume Echevarria (LSE)
Agroforesterie	M2 AETPF	CM	Introduction à l'agroforesterie	4	Alice Michelot-Antalik (LAE)
		TP	Expérimentations en agroforesterie	6	
		TD	Sortie exploitation et jury	8	
Ecologie prairiale	M2 AETPF	CM	Ecologie des écosystèmes prairiaux	9	Alice Michelot-Antalik (LAE)
		TP	Botanique et mesures de traits fonctionnels	8	
		TP	Sortie habitats	8	
		TD	Analyses de données	4	
Projet R&D	1A	TD	Accompagnement projet recherche	2	Guido Rychen (URAFPA)
Ecophysiologie des plantes cultivées	1A	CM	Production primaire	6	Séverin Piutti (LAE)
		TD	Facteurs régulant la production primaire	6	
		TD	Paramètres de croissance	6	
		TP	Analyse de croissance	9	
Introduction à l'écologie	1A	CM	Ecologie des communautés, cycles biogéochimiques	5	Alice Michelot-Antalik (LAE)
		Jury	Exposés	12	
Bioéconomie	2A	TD	Fresque de la biodiversité	12	Geoffroy Séré (LSE)
Analyse de l'exploitation agricole	1A	TD	Visite et analyse du fonctionnement d'une exploitation agricole	12	Guido Rychen (URAFPA)
Systèmes de production végétale 2	2A	CM	Cultures fourragères	3	Sylvain Plantureux (LAE)
Gestion des systèmes fourragers	1A	TP	Sortie relevés floristiques prairie	12	Sylvain Plantureux (LAE) Guido Rychen (URAFPA)
Systèmes de production végétale 1	1A	TP	Reconnaissance des adventices des cultures	18	Sylvain Plantureux (LAE)
Soutenances de stages de M1	M2 AETPF	Jury	Jury de soutenances	4	Sandrine Chauchard (SILVA) Nadia Michel (LAE)
Soutenances de stages de M2	M2 AETPF	Jury	Jury de soutenances	4	Sandrine Chauchard (SILVA) Nadia Michel (LAE)
Analyse bibliographique	M2 AETPF	Jury	Jury d'exposés oraux	4	Sandrine Chauchard (SILVA) Nadia Michel (LAE)

2. Responsabilités en enseignement

Depuis 2021 : Membre de la commission Développement Durable de L'ENSAIA

Depuis 2018 : Membre de la commission Césure de l'ENSAIA

Depuis 2018 : Responsable du master AETPF Nancy pour l'ENSAIA

Depuis 2018 : Membre de l'équipe pédagogique du master AETPF

Depuis 2018 : Responsable d'un module de 1ère année ENSAIA « Introduction à l'écologie » (150 étudiants)

Depuis 2018 : Responsable de deux UE de M2 « Agroforesterie » (40 étudiants) et « Ecologie prairiale » (30 étudiants)

Depuis 2014 : Représentante du service Sciences Végétales au jury ENSAIA

III. Activités de recherche

1. Projets de recherche

1. 2022-2025 : ESPRES : Evaluation du Service de Pollinisation dans des territoires en REduction d'utilisation de pesticides et interaction avec le Service de régulation des ravageurs. **Coordinatrice.** (Financement Ecophyto II +)
2. 2021-2022 : FLORES :Weed FLORal RESource potential and diversity in Mediterranean vineyards and olive agroecosystems. **Partenaire.** (Financement : Agropolis fondation)
3. 2021-2027 : Be-Creative : Co-Conception de territoires sans pesticides. **Coordinatrice du WP3, action 1.** (Financement : ANR Cultiver et protéger autrement)
4. 2021-2023 : Grand Nancy Terre de pollinisateurs. **Coordinatrice.** (Financement : AMI TVB Biodiversité, Région Grand Est, DREAL, Agence de l'eau Rhin-Meuse)
5. 2020 : Projet collaboratif : Améliorer la gestion des ressources florales pour conserver les pollinisateurs sauvages du Grand Nancy. **Coordinatrice.** (Financement : Pôle A2F, Université de Lorraine)
6. 2020-2021 : Polliflor : Caractérisation fonctionnelle des habitats agro-pastoraux et effets des pratiques de gestion pour les communautés d'insectes pollinisateurs. **Coordinatrice.** (Financement : GDR Pollineco, Ministère de la transition écologique et solidaire, CNRS INEE)
7. 2019-2023 : REEVES : Maîtriser les espèces exotiques végétales envahissantes. **Partenaire.** (Financement : SNCF Réseau)
8. 2018-2021 : SURPAS : Etat de conservation des systèmes agropastoraux. **Partenaire et coordinatrice site Lorraine.** (Financement : Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire)
9. 2018-2019 : PESI : Pasture Ecosystem Services Indicators. **Partenaire.** (Financement : Inra, Ecoserv)
10. 2018 : Projet jeune chercheur : Etude fonctionnelle des interactions plantes-pollinisateurs en prairie permanente sous l'effet des pratiques de gestion agricole. **Coordinatrice.** (Pôle A2F, Université de Lorraine)
11. 2017 : Projet structurant : Effet des pratiques de gestion sur les interactions plantes-pollinisateurs et les services écosystémiques en prairie. **Coordinatrice.** (Financement : Pôle A2F, Université de Lorraine)
12. 2016-2018 : PSDR ASTRAL : Acteurs et Services écosystémiques des Territoires Ruraux Lorrains. **Partenaire.** (Financement INRAE, Région Grand-Est)
13. 2015-2017 : Polipré : Explorer le service de pollinisation rendu par l'écosystème prairial grâce à l'analyse des transports de pollen à l'aide de méthodes de barcoding. **Partenaire et coordinatrice site Lorraine.** (Financement : Inra Ecoserv)
14. 2015-2016 : AGRAF : Agroécologie pour la production Animale et Fourragère. Module d'enseignement en e-learning. **Partenaire et coordinatrice du module 2** « Ecologie prairiale ». (Financement ANR Université de Technologie Ouverte Pluripartenaire)

15. 2014-2016 : Projet Renouée : Gestion raisonnée des Renouées invasives sur le ban communal de Laxou : connaitre, lutter, informer. **Partenaire**. (Financement : Fondation de France)
16. 2013-2014 : SICFOR : Du Suivi aux Indicateurs de Changement climatique en FORêt. **Coordinatrice**. (Financement : Ministère de l'agriculture, de l'agro-alimentaire et de la forêt, GIP ECOFOR)
17. 2012-2013 : TRAITAUT : TRAITs fonctionnels et AUTécologie des essences forestières. **Coordinatrice**. (Financement : Réseau Mixte Technologique AFORCE, GIP ECOFOR)
18. 2011-2012 : R2DS : Étude des trajectoires fonctionnelles des dépérissements forestiers : cas du massif de Fontainebleau (hêtre-chêne). **Partenaire**. (Financement CNRS)
19. 2008-2011 : AFOCLIM : Les arbres forestiers face aux variations du climat : comprendre le passé et prévoir le futur par l'analyse des cernes des arbres. **Partenaire**. (Financement GIS Climat-Environnement-Société)

2. Encadrement de la recherche

2.1. Thèses co-dirigées

1. **Camille Gay**. 2021- (Ecole doctorale SIRENA). Déterminants paysagers de la diversité taxonomique et fonctionnelle des insectes pollinisateurs en paysage agricole – Revue de littérature et modélisation. Bourse CIFRE. Direction : Olivier Thérond (33 %), co-direction : Nadia Michel (33 %), co-direction : Alice Michelot-Antalik (33 %)
2. **Jérémy Goulnik**. 2016 – 2019 (Ecole doctorale SIRENA). Étude fonctionnelle de la fonction de pollinisation entomophile en prairie permanente sous l'effet d'un gradient d'intensification agricole. Bourse MENRT. Direction : Sylvain Plantureux (50 %), co-direction : Alice Michelot-Antalik (50 %)

2.2. Stagiaires co-encadrés

- **Master 2-ingénieur**

2022 : **Héloïse Chouteau**. Restauration écologique des talus ferroviaires : comment la complémentarité fonctionnelle des plantes de restauration influence-t-elle les interactions compétitives et allélochimiques avec les plantes invasives ?

2022 : **Valentin Delpierre**. Suivi expérimental des pollinisateurs pour améliorer la gestion différenciée des espaces verts et analyse des interactions plantes-pollinisateurs à l'échelle du Grand Nancy

2022 : **Thibault Gandara**. Evaluation d'indicateurs du service de pollinisation à l'échelle des territoires

2022 : **Margaux Quinzoni**. Quelles plantes ornementales pour les pollinisateurs en milieu urbain ? Une approche fonctionnelle par la mesure de traits floraux et de leur réponse à la sécheresse.

2021 : **Adeline Comte**. Étude expérimentale des impacts de la tonte et du paysage sur les communautés de plantes-pollinisateurs au sein d'espaces verts urbains du Grand Nancy

2021 : **Lucile Petit**. Influence de la diversité floristique sur les interactions plantes-pollinisateurs dans la métropole du Grand Nancy

2020 : **Thomas Lavorel**. Mise en place d'un réseau de suivi expérimental analysant l'effet des pratiques de gestion sur les ressources florales et les pollinisateurs en milieu urbain

2020 : **Sarah Lemetayer**. Diversité des insectes pollinisateurs et caractérisation fonctionnelle des ressources florales dans divers habitats prairiaux en France

2020 : **Léa Genty**. Effets d'une restauration écologique couplant fauche et compétition sur la croissance de la Renouée du Japon (*Fallopia japonica*) et sur la diversité des communautés végétales

2019 : **Olbesa Kaci**. Plant and soil fauna functional traits analysis on meadows developed on constructed Technosols.

2019 : **Lisa Poisse**. Evaluation et validation d'indicateurs de services écosystémiques rendus par les prairies

2018 : **Juliette Ducrettet**. Rôle des nectars pour la caractérisation fonctionnelle des communautés plantes-pollinisateurs en prairie permanente.

2017 : **Mitra Tehranchi**. Effet d'une stratégie de lutte biologique contre l'expansion de la Renouée du Japon sur la restauration de la végétation

2017 : **Marie-Claire Gégout**. Effet des pratiques agricoles sur les services écosystémiques en prairie

2016 : **Nina Bayer**. Effets des stratégies de lutte contre l'expansion des Renouées asiatiques sur la restauration de la végétation et du sol

2016 : **Emile Delacroix**. Analyse des interactions plantes-pollinisateurs en prairie agricole par relevés taxonomiques et méthodes de bar-coding

2015 : **Renaud Morellato**. Mise en place d'essais de restauration écologique et d'éco-pâturage dans le but de lutter contre les Renouées invasives (*Fallopia japonica* et *Fallopia sachalinensis*)

- **Césure**

2021 : **Hélène Carletti**. Allélochimie et compétition de la Renouée du Japon (*Reynoutria japonica*) vis-à-vis de plantes candidates à des stratégies de lutte écologique contre des plantes invasives

- **Master 1**

2021 : **Margaux Quinanzoni**. Etude des traits floraux pour les pollinisateurs dans différentes prairies mésophiles en Lorraine

2021 : **Hélène Lirot**. Allélochimie et compétition de la Renouée du Japon (*R. japonica*) vis à vis de plantes candidates à des stratégies de lutte écologique contre des plantes invasives

2020 : **Arthur Sarrazin**. Effets de différentes méthodes de restauration écologique sur les réserves en amidon des rhizomes de renouées asiatiques

2019 : **Margaux Planchon**. Estimation de l'efficacité de différents traitements d'éradication d'une plante invasive, la Renouée du Japon, par estimation du processus de mise en réserve de composés carbonés dans les rhizomes

2019 : **Marine Bauer**. Estimation de l'efficacité de différents traitements d'éradication d'une plante invasive, la Renouée du Japon, par estimation du processus de mise en réserve de composés carbonés dans les rhizomes

2018 : **Clara Dumon**. Effet de l'intensité des pratiques agricoles sur les traits floraux en prairie permanente

2018 : **Alexis Parret**. Analyse des interactions plante-pollinisateur selon un gradient de pratiques agricoles en prairie permanente

2017 : **Lucie Sepulchre**. Analyse taxonomique et fonctionnelle des interactions plantes-pollinisateurs en prairie permanente

2017 : **Catherine Heinrich**. Analyse des traits fonctionnels des plantes et des pollinisateurs en prairie sous différents modes de gestion

2016 : **Emilie Gras**. Analyse des relations plantes-pollinisateurs en prairie permanente

2015 : **Laetitia Martini**. Suivi floristique et évaluation agri-écologique des prairies permanentes du système expérimental de Mirecourt

2011 : **Lucie Rupil**. Etude de la dynamique saisonnière des réserves carbonées de trois essences forestières (Chêne, Hêtre et Pin) en forêt de Fontainebleau

- **L3**

2019 : **Rémi Thouvenin**. Mesures de la masse corporelle des pollinisateurs de prairie

2018 : **Emilie Théron**. Effet de l'intensification de l'agriculture sur les pollinisateurs en prairie

2018 : **Clémence Péchinot**. Interactions plante-pollinisateurs en prairies selon différents modes de gestion agricole

2018 : **Julien Pierre**. Interactions plante-pollinisateurs en prairies selon différents modes de gestion agricole

2009 : **Sophie Monsarrat**. Analyse comparative des réserves carbonées de deux essences forestières : *Quercus petraea* et *Pinus sylvestris* en forêt de Fontainebleau

- **L2**

2008 : **Fabien Spicher**. Influence des variations climatiques interannuelles sur la croissance radiale de trois essences forestières tempérées de 1960 à 2007

2.3. Contrats ingénieurs

2021-2022 (9 mois) : **Alban Langlois**. Ingénieur d'étude en écologie fonctionnelle sur les interactions plantes-pollinisateurs

2020-2021 (8 mois) : **Sarah Lemetayer**. Ingénieur d'étude (projet SURPAS/POLLIFLOR)

2.4. Comités de thèse

2017-2020 : **Geoffrey Mesbahi**. Prédiction de propriétés agroécologiques de prairies permanentes et de leurs compromis : l'exemple du massif vosgien. Ecole Doctorale SIRENA, UMR LAE - Direction de thèse : Sylvain Plantureux, Cécile Bayeur

2013-2016 : **Ambre David**. Vers une compréhension du fonctionnement carboné et écohydrologique des tilleuls argentés (*Tilia tomentosa Moench*) plantés en alignement à Paris. Ecole Doctorale 227 MNHN-UPMC « Sciences de la Nature et de l'Homme : évolution et écologie », IEES – Direction de thèse : Luc Abbadie, Jérôme Ngao et Jean-Christophe Lata

3. Expertise scientifique

3.1. Jury de concours

2022 : Jury de recrutement titulaire MCF 652 Ecologie, Université de Bordeaux

2021 : Jury de recrutement titulaire MCF 0077 Agroécologie, INP-ENSAT Toulouse

2021 : Jury de recrutement suppléante MC 16-598 Ecologie VetAgro Sup Clermont-Ferrand

2020 : Jury de recrutement titulaire MCF-0161 Ecologie des communautés végétales et biologie de la conservation, Université de Lorraine

3.2. Evaluation de projets

2021 : Appel national Plan Ecophyto II+ volet 1 thèses

2018 : ANRT Obtention bourses CIFRE

2015 : Appel à projet Domaine d'intérêt majeur "Agrosciences, Ecologie des Territoires, Alimentation"

3.3. Reviews d'articles

En moyenne 2 par an dans les revues : Global change biology (IF: 10.9), Journal of total environment (8.0), Functional ecology (IF: 5.6), Acta oecologia (IF : 1.6), Biodiversity Data Journal (IF : 1.2), Fourrages (IF : 0.2), European grassland federation proceedings, Osmia, Revue forestière française

3.4. Base de données informatique

Depuis 2016 : associée au développement d'une base de données informatiques dédiée aux prairies permanentes : eFLORAsys (<http://eflorasys.univ-lorraine.fr>)

4. Vulgarisation scientifique

2022 : **Interview dans le 18h30 France 3 Lorraine.** Conserver la biodiversité en ville et les pollinisateurs. 20 mai

2022 : **Introduction du colloque Life Biocorridor Milieux ouverts.** Webinaire. 28 avril

2022 : **Présentation du projet Grand Nancy Terre de pollinisateurs.** Atelier Expert Animal en Ville 4 - Biodiversité et sensibilisation – Ville de Nancy. Nancy. 26 avril

2021 : **Table ronde évènement « Jardins de Vi(II)e »** organisée par la métropole de Nancy. Comment préserver la biodiversité dans nos villes ? Jarville la Malgrange. 25 septembre

2021 : **Participation à une vidéo de présentation** du projet REEVES. SNCF réseau. 23 juillet
<https://www.youtube.com/watch?v=cBiBOzYILxs>

2021 : **Présentation orale en studio** au forum REEVES 2021. Analyse des interactions allélochimiques entre la Renouée du Japon et les plantes de restauration indigènes du Grand-Est. Reims. 1^{er} juillet

2021 : **Table ronde « Université d'été – Questions environnementales et Sciences humaines et sociales : quelles perspectives ? »** Prendre en compte la biodiversité : un projet de territoire

? Organisée par ENSA de Nancy – LHAC) - Université de Lorraine - ED Humanités nouvelles Fernand Braudel / Centre de recherche sur les médiations. Visio-conférence. 8 juin

2021 : **Interview en direct Journal Régional Lorraine 19-20h France 3**. Présentation du projet Grand Nancy terre de pollinisateurs. 11 mai

2020 : **Vidéo liée au projet Polliflor** par le partenaire Géolab. Journal Régional Auvergne France 3. Pourquoi des chercheurs du CNRS s'intéressent aux insectes pollinisateurs du Puy-de-Dôme ? 3 juillet

2019 : **Participation à un documentaire** sur les prairies : « Nos prairies valent de l'or ». Diffusé sur Arte en 2020

2019 : **Jury du concours « Prairies fleuries »** pour le Parc Naturel Régional de Lorraine. 5 juin

2018 : **Journée d'animation** pour le Parc Naturel Régional de Lorraine. Les interactions plantes-pollinisateurs en prairies. Mulcey. 30 juin

2015 : **Participation à un documentaire** sur le concours « Prairies fleuries ». Parc Naturel Régional des Ballons des Vosges. 11 mars

<https://www.youtube.com/watch?v=5Z9RXng47w8&list=PLcGxmZf4fylvUdSfmZ6kIFa6H0FplY4jP>

2014 : **Jury du concours « Prairies fleuries »** pour le Parc Naturel Régional des Ballons des Vosges. 2 juin

5. Responsabilités administratives

Depuis 2022 : **Elue collègue B** au conseil du Pôle Agronomie, Agroalimentaire, Forêt, Université de Lorraine

2021-2022 : **Membre du comité local, du comité scientifique** et du GT développement durable pour l'organisation du colloque SFE² Metz 2022 : « Ecology and Evolution: New perspectives and societal challenges »

Depuis 2021 : **Responsable de deux techniciens** INRAE au LAE (Jodie Thénard et David Marcolet)

Depuis 2018 : **Membre du Copil PNA** pollinisateurs Grand Est

Depuis 2017 : **Animatrice scientifique** de l'équipe AGISEM

Depuis 2017 : **Membre fondateur** de l'association SPIGEST (Synergie plantes invasives Grand Est) avec Norematt, la ville de Vandoeuvre, la Ville de Laxou, L'URAFPA, l'ENSAIA et le LAE

6. Productions scientifiques

6.1. Publications dans des revues internationales avec comité de lecture

J'ai contribué à la rédaction de 17 publications dans des revues à comité de lecture dont 14 dans des revues internationales et 3 dans des revues nationales. Je suis 1^{ère} auteure de 7 articles, dernière auteure de 3 articles que j'ai supervisés et 3 fois deuxième auteure. Les facteurs d'impacts des revues internationales (recensés en 2020) dans lesquelles j'ai publié varient de 1.6 à 7.2 avec une moyenne de 4.1. Mes articles cumulaient 684 citations en septembre 2022 et mon h-index était de 8 (source Google Scholar).

1. Ulmer, R., Couty, A., Eslin, P., Catterou, M., Baliteau, L., Bonis, A., Borowiec, N., Colinet, H., Delbac, L., Dubois, F., Estoup, A., Froissard, J., Gallet-Moron, E., Gard, B., Georges, R., Gibert, P., Le Goff, I., Lemauviel-Lavenant, S., Loucougaray, G., **Michelot-Antalik, A.**, Odoux, J.-F., Pincebourde, S., Rode, N.O., Thaon, M., Till-Bottraud, I., Chabrerie, O. (2022). Macroecological patterns of fruit infestation rates by the invasive fly *Drosophila suzukii* in the wild reservoir host plant *Sambucus nigra*, *Agricultural and Forest Entomology* (IF: 2.5)
2. Lerch, S., Sirguy, C., **Michelot-Antalik, A.**, Jurjanz, S. (2022). Accumulation of metallic trace elements in *Reynoutria japonica*: a risk assessment for plant biomass valorization. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20485-7> (IF: 4.2)
3. GoulNIK, J., Plantureux, S., Dajoz, I., **Michelot-Antalik, A.** (2021). Using Matching Traits to Study the Impacts of Land-Use Intensification on Plant–Pollinator Interactions in European Grasslands: A Review. *Insects*, 12 (8), 680. <https://doi.org/10.3390/insects12080680> (IF: 2.8)
4. **Michelot-Antalik, A.**, Michel, N., GoulNIK, J., Blanchetête, A., Delacroix, E., Faivre-Rampant, P., Fiorelli, J.-L., Galliot, J.-N., Genoud, D., Lanore, L., Le Clainche, I., Le Paslier, M.-C., Novak, S., Odoux, J.-F., Brunel, D., Farruggia, A. (2021). Comparison of grassland plant-pollinator networks on dairy farms in three contrasting French landscapes. *Acta Oecologica*, 112, <https://doi.org/10.1016/j.actao.2021.103763> (IF: 1.6)
5. GoulNIK, J., Plantureux, S., They, Van Reeth, C., Baude, M., Mesbahi, G., **Michelot-Antalik, A.** (2020). Facial area and hairiness of pollinators visiting semi-natural grassland wild plants predict their facial pollen load. *Ecological Entomology*, 45, <https://doi.org/10.1111/een.12913> (IF: 2.5)
6. GoulNIK, J., Plantureux, S., They, M., Baude, M., Delattre, M., Van Reeth, C., Villerd, J., **Michelot-Antalik, A.** (2020). Floral trait functional diversity is related to soil characteristics and positively influences pollination function in semi-natural grasslands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 301, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107033> (IF: 5.6)
7. Mesbahi, G., **Michelot-Antalik, A.**, GoulNIK, J., Plantureux, S. (2020). Permanent grassland classifications predict agronomic and environmental characteristics well, but not ecological characteristics. *Ecological Indicators*, 110, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105956> (IF: 5.0)
8. **Michelot-Antalik, A.**, Granda, E., Fresneau, C., Damesin, C. (2019). Evidence of a seasonal trade-off between growth and starch storage in declining beeches: assessment through stem radial increment, non-structural carbohydrates and intra-ring $\delta^{13}\text{C}$. *Tree Physiology*, 39 (5), <https://doi.org/10.1093/treephys/tpz008> (IF: 4.2)
9. Daux, V., **Michelot-Antalik, A.**, Lavergne, A., Pierre, M., Stievenard, M., Breda, N., Damesin, C. (2018). Comparisons of the performance of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of *F. sylvatica*, *P. sylvestris* and *Q. petraea* in the record of past climate variations. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123 (4), <https://doi.org/10.1002/2017JG004203> (IF: 3.8)
10. Poutaraud, A., **Michelot-Antalik, A.**, Plantureux, S. (2017). Grasslands: A Source of Secondary Metabolites for Livestock Health. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65 (31), <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00425> (IF: 5.3)

11. **Michelot A.**, Simard S., Rathgeber C., Dufrêne E., Damesin C. (2012). Comparing the intra-annual wood formation of three European species (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*) as related to leaf phenology and non-structural carbohydrate dynamics. *Tree physiology*. 32 (8), <https://doi.org/10.1093/treephys/tps052> (IF: 4.2)
12. **Michelot A.**, Bréda N., Damesin C., Dufrêne E. (2012). Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. *Forest Ecology and Management*, 265, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.10.024> (IF: 3.6)
13. **Michelot A.**, Eglin T., Dufrêne E., Lelarge-Trouverie C., Damesin C. (2011). Comparison of seasonal variations in water-use efficiency calculated from the carbon isotope composition of tree rings and flux data in a temperate forest. *Plant Cell and Environment*, 34, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02238.x> (IF: 7.2)
14. Eglin T., François C., **Michelot A.**, Delpierre N., Damesin C. (2010). Linking intra-seasonal variations in climate and tree-ring $\delta^{13}\text{C}$: a functional modelling approach. *Ecological Modelling*, 221, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.04.007> (IF: 3.0)

6.2. Publications dans des revues nationales avec comité de lecture

15. Mesbahi, G., Bayeur, C., **Michelot-Antalik, A.**, Plantureux, S. (2019). Quelles typologies pour la prédiction des propriétés des prairies permanentes ? *Fourrages*, 237 (IF: 0.2)
16. **Michelot-Antalik, A.**, Gachet, S., Legay, M., Landmann, G. (2014). Vers un outil d'aide à la décision pour l'adaptation des forêts françaises au changement climatique. *Forêt Entreprise*. 217
17. **Michelot-Antalik, A.**, Gachet, S., Legay, M., Landmann, G. (2014). Vers un outil d'aide à la décision pour l'adaptation des forêts françaises au changement climatique. *Innovations Agronomiques*, INRA, 2014, 41.

6.3. Publications dans des actes de colloques internationaux

1. Goulnik, J., Plantureux, S., Thery, Baude, M., Delattre, M., Van Reeth, C., Villerd, J., **Michelot-Antalik, A.** (2020). Pollination function is positively influenced by floral traits functional diversity in semi-natural grasslands, 28th General Meeting of the European Grassland Federation - 2020 EGF, 19-21 octobre 2020, Helsinki (Finlande)
2. Taugourdeau, S., Messad, S., Louault, F., **Michelot-Antalik, A.**, Vigneron, M., Poisse, L., Yentur, L., Millet, C.P. Bastianelli, D., Carrere, P., Plantureux, S. (2020). Pasture Ecosystem Services Indicators: an expert based set of indicators of ecosystem services. 28th General Meeting of the European Grassland Federation. Helsinki, Finland, 19-21 octobre 2020

6.4. Publications dans des actes de colloques nationaux

3. Farruggia, A., Delacroix, E., **Michelot-Antalik, A.**, Michel, N., Lanore, L., Genoud, D., Berard, A., Chauveau, A., Novak, S., Fiorelli, J-L, Blanchetete, A., Odoux, J-F, Galliot, J-N, Brunel, D. (2016). Insectes butineurs et transport de pollen : 1er maillon de l'étude du service de pollinisation rendu par l'écosystème prairial. 23ème édition congrès international francophone rencontres recherches ruminants, 7 et 8 décembre 2016, Paris, France

4. Lerch, S., **Michelot-Antalik, A.**, Guillier, M., Kenens, M., Marion, A., Morellato, R., Janser, D., Wieser, L., Montagne, P., Jurjanz, S. (2016). L'écopâturage caprin, une méthode de lutte efficiente face à l'invasion des renouées asiatiques en milieu urbain. Rencontres - Recherches - Ruminants, Dec 2016, Paris, France

6.5. Rapports techniques et d'expertise

1. Amiaud, B., Attia, F., Barataud, F., Bradel, V., Brantonne, A., De Carbonnel, A., Chauchard, S., Desmartin, M., Gouju, A., Jeannelle, A., Maillant, S., Michel, N., **Michelot-Antalik, A.**, Mignolet, C., Picon, M., Pierlot, F., Piutti, S., Séré, G., Voléry, I., Wohlfahrt, J. (2020). ASTRAL : Acteurs et Services écosystémiques des Territoires RurAux Lorrains, 22 p.
2. Collard, J., Mosse, N., Kenens, M., Jurjanz, S., Le Roux, Y., **Michelot-Antalik, A.**, Tehranchi, M., Montagne, P., (2018). Guide pratique pour une gestion raisonnée des renouées asiatiques, 14 p.
3. Asse, D., **Michelot-Antalik, A.**, Landmann, G. (2014). Projet SICFOR. Du suivi aux indicateurs de changement climatique en forêt. Paris : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt - GIP Ecofor. Rapport final, 102 p.
4. **Michelot, A.**, Gachet, S., Legay, M., Landmann, G. (2013). L'autécologie des essences forestières et son intégration dans les outils d'aide à la décision : synthèse et évaluation. Paris : GIP Ecofor – RMT Aforce, 44 p.

6.6. Conférences invitée

1. **Michelot-Antalik, A.** (2021). Les pollinisateurs, maillons incontournables des prairies. Les prairies permanentes : notre avenir en herbe. Massif des Vosges – 15 sept. 2021 – Meisenthal, France
2. **Michelot-Antalik, A.**, Jurjanz, S. (2019). Les renouées asiatiques : comment gérer ces plantes invasives par écopâturage et restaurer les milieux ? Journée jeunes chercheurs - 3ème édition - Valorisation du végétal entre recherche et innovation, Avril 2019, Vandœuvre-lès-Nancy, France
3. **Michelot-Antalik, A.** (2013). Stratégies d'adaptation et outils d'aide à la décision pour la gestion forestière face au changement climatique. Colloque Impact de l'anthropisation et des changements climatiques sur les arbres forestiers : du fondamental à l'appliqué, un dialogue entre science et société, Paris, France. **Chairman**
4. **Michelot, A.**, Gachet, S., Legay, M., Landmann, G. (2012). Le projet Traitaut : Traits fonctionnels et autécologie des essences forestières. Colloque de restitution des projets du RMT Aforce, 2012, Paris, France
5. **Michelot, A.** (2012). Vers un outil d'aide à la décision intégrant l'autécologie des essences dans le contexte des changements climatiques. Séminaire interne ONF R&D, Paris, France
6. **Michelot, A.** (2012). Comment les arbres forestiers répondent-ils aux changements climatiques ? Comprendre la croissance de trois essences majeures en Europe dans une forêt tempérée. Conférence IMBE, Marseille, France

7. **Michelot, A. (2012).** Traitaut : Rénovation de l'autécologie des essences forestières dans le contexte des changements climatiques. Groupe de travail « Modélisation de la présence des habitats » - projet CarHAB, Paris, France
8. **Michelot, A. (2010).** Comment les arbres forestiers répondent-ils aux changements climatiques ? - Comprendre la croissance de trois essences majeures en Europe dans une forêt tempérée. Séminaire de l'Atelier thématique "Réponses des plantes aux facteurs physiques de l'environnement" de l'IFR 87, Orsay, France

6.7. Communications orales dans des colloques internationaux

1. Tardif, A., Boubert, P., Boulembert, M., Madej, L., Burst, M., Catterou, M., Dubois, F., Dubois, F., Lacoux, J., Ulmer, R., Dutoit, T., Mesléard, F., Frontès, H., Loucougaray, G., **Michelot-Antalik, A.**, Plantureux, S., Alard, D., Lemauviel-Lavenant, S., Diquelou, S., Bonis, A., Chabrerie, O. (2021). Environmental drivers of plant diversity of chalk grasslands in north-western France. International Electronic Conference on Biological Diversity, Ecology and Evolution. Section: Biodiversity Loss and Dynamics
2. Taugourdeau, S., Plantureux, S., Louault, F., **Michelot-Antalik, A.**, Carrere, P., Messad, S. (2020) An expert-based set of indicators of temperate Grassland ecosystem services. the Joint International Grassland and International Rangeland Congress, Nairobi, Kenya, October 25 – 30, 2020
3. Goulnik, J., Plantureux, S., They, M., **Michelot-Antalik, A.** (2019). Linking functional diversity of floral traits with land-use intensification to study pollination function in permanent grasslands. International conference on ecological sciences, Oct 2018, Rennes, France
4. Kohli, A., Auclerc, A., **Michelot-Antalik, A.**, Allory, V., Rees, F., Schwartz, C., Morel, J.-L., Séré, G. (2019). Ecosystem services provided by Technosols constructed for agricultural purposes. SUITMA 10, June 2019, Seoul, South Korea
5. Goulnik, J., Plantureux, S., They, M., **Michelot-Antalik, A.**, (2018). Linking functional diversity of floral traits with land-use intensification in grasslands to study pollination function in european grasslands, Functional Ecology Conference, Nancy, France
6. **Michelot-Antalik, A.**, Bayer, N., Morellato, R., Lerch, S., Jacquot, G., Wieser, L., Montagne, P. (2016). Establishing ecological strategies to limit the expansion of *Reynoutria japonica*: effects on vegetation restoration. International conference on ecological sciences, Oct 2016, Marseille, France
7. Granda, E., Delpierre, N. , Bazot, S. , Fresneau, C., Boura, A. , Faccioni, G. , Dufrêne, E. , Berveiller, D. , **Michelot-Antalik, A.** , Vincent, G. , Damesin, C. (2015). Intra-annual tree ring $\delta^{13}\text{C}$ across time: tracking the responses of *Q. petraea* to climatic variation. European Ecological Federation Conference (EEF) September 21-25, 2015, Rome, Italy.
8. **Michelot, A.**, Bréda, N., Damesin, C., Rathgeber, C., Simard S., Dufrêne, E. Understanding the growth of three tree species under climate change in a temperate forest. (2010). TRACE 2010, Friburg, Germany. **Distinction parmi les trois meilleures présentations**
9. **Michelot, A.**, Eglin, T., Dufrêne, E., Lelarge-Trouverie, C., Damesin, C. Comparison of seasonal variations in water-use efficiency calculated from the carbon isotope composition of tree rings and flux data in a temperate forest. (2008). JESIUM 2008, Giens, France

6.8. Communications orales dans des colloques nationaux

1. **Michelot-Antalik, A.**, Allard, B., Baliteau, L., Baude, M., Boulembert, M., Chabrierie, O., Langlois, A., Lemauviel-Lavenant, S., Lemetayer, S., Michel, N., Odoux, J.-F., Tardif, A., Bonis, A. (2021). POLLIFLOR: Functional diversity of grassland communities for pollinators. GDR POLLINECO 3^{ème} réunion annuelle, 16-18 novembre 2021, Toulouse, France
2. **Michelot-Antalik, A.**, Michel, N., Baude, M., Burst, M., Chabrierie, O., Lemauviel-Lavenant, S., Odoux, J. F., Plantureux, S., Lemetayer, S., Tardif, A., Allart, B., Bille, P.-E., Bonis, A. (2020). POLLIFLOR : Caractérisation fonctionnelle des habitats agropastoraux pour les communautés d'insectes pollinisateurs. GDR POLLINECO 2^{ème} session, Oct 2020, Mons, Belgique
3. Michelot-Antalik, A., Michel, N., Lecocq, T., Delagneau, L., Jouanet, L., Soret, J., Lavorel, T., Vallet, A. (2020). Améliorer la gestion des ressources florales pour conserver la biodiversité des pollinisateurs sauvages de la métropole de Nancy. GDR Pollineco 2^{ème} Session, Oct 2020, Mons, Belgique
4. Goulnik, J., Plantureux, S., Thery, M., Baude, M., **Michelot-Antalik, A.** (2019). Relations entre diversité fonctionnelle des traits floraux et intensification agricole pour étudier la fonction de pollinisation en prairie permanente. GDR Pollineco 1^{ère} rencontre, 26 mars 2019, Montpellier, France
5. **Michelot-Antalik, A.**, Michel, N., Goulnik, J., Brunel, D., Berard, A., Blanchetete, A., Chauveau, A., Genoud, D., Faivre-Rampant, P., Fiorelli, J.-L., Lanore, L., Le Clainche, I., Novak, S., Odoux, J. F., Farruggia, A. (2019). Analyse de réseaux plante-pollinisateurs pour évaluer la pollinisation des prairies dans trois zones agricoles françaises contrastées. GDR Pollineco 1^{ère} rencontre, 26 mars 2019, Montpellier, France
6. Tehranchi, M., **Michelot-Antalik, A.** (2017). Epuisement par fauches répétées et restauration par compétition végétale. 2^{ème} Rencontre régionale pour une gestion intégrée des renouées invasives, 5 octobre, Laxou, France.
7. Tehranchi, M., **Michelot-Antalik, A.** (2017). Bases scientifiques de la restauration écologique terrestre. 2^{ème} Rencontre régionale pour une gestion intégrée des renouées invasives, 5 octobre, Laxou, France.
8. Plantureux, S., Amiaud, B., Blaise, O., Blanc F., Bonaudo, T., De Sainte Marie, C., Gaujour, E., Jouven, M., Mestelan, P., **Michelot-Antalik A.** (2015). AGRAF, le « elearning » pour la formation à l'agroécologie en production fourragère et animale. Séminaire du réseau « Prairies » INRA, 4-5 novembre 2015, Vandoeuvre-lès-Nancy, France
9. Morellato, R., **Michelot-Antalik, A.**, Montagne, P., Jacquot, G. (2015). Lutte biologique intégrée contre les renouées asiatiques : essais de restauration écologique par concurrence végétale. 1^{ère} Rencontre régionale pour une gestion intégrée des renouées invasives, 11 juin 2015, Laxou, France.
10. **Michelot, A.** (2013). Le projet Sicfor : Du suivi aux indicateurs de changement climatique en forêt – cadres conceptuel et méthodologique. Séminaire de lancement du projet Sicfor, Paris, France
11. **Michelot, A.** (2012). Avancement et suites du projet Traitaut. Séminaire d'avancement du projet Traitaut, Paris, France

12. **Michelot, A.**, Simard, S., Rathgeber, C., Dufrêne, E., Damesin, C. (2010). Croissance saisonnière et $\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne de trois essences forestières tempérées (Hêtre, Chêne sessile et Pin sylvestre). Ecologie 2010, Montpellier, France
13. **Michelot, A.** (2012). L'autécologie pour développer des outils d'aide à la gestion forestière – Exemples à l'étranger. Séminaire de lancement du projet Traitaut, Paris, France
14. **Michelot, A.** (2008). The Functioning of forest trees under climate changes: a dendro-isotopic approach. PhD days 2008, Gif-sur-Yvette, France

6.9. Posters

1. Allard, B., Bonis, A., Baliteau, L., Baude, M., Boulembert, M., Chabrierie, O., Langlois, A., Lemauviel-Lavenant, S., Lemetayer, S., Michel, N., Odoux, J.-F., Tardif, A., **Michelot-Antalik, A.** (2021). How much is pollinator diversity and abundance related to floral traits in various grassland habitats? 12 – 15 December 2021 Liverpool International Conference Centre, UK
2. Goulnik, J., Plantureux, S., **Michelot-Antalik, A.** (2018). Effets d'un gradient de pratiques de gestion agricole sur les interactions plantes-pollinisateurs en prairie permanente. Journée de l'école doctorale SIRENA
3. Goulnik, J., **Michelot-Antalik, A.** (2018). Qu'est-ce qui attire les insectes pollinisateurs sur les prairies ? Journée d'animation pour le Parc Naturel Régional de Lorraine. Les interactions plantes-pollinisateurs en prairies. Mulcey, 30 juin
4. Faivre-Rampant, P., Farruggia, A., Galliot, J.-N., **Michelot-Antalik, A.**, Novak, S., Chauveau, A., Berard, A., Le Clainche, I., Odoux, J. F., Fiorelli, J.-L., Lanore, L., Michel, N., Le Paslier, M.-C., Brunel, D. (2018). Flower-foraging insects and their pollen loads in french permanent grasslands. Presented at PAG XXVI - Plant and Animal Genome Conference, San Diego, USA
5. Morellato, R., **Michelot-Antalik, A.**, Montagne, P., Jacquot, G., Lerch, S. (2015). Essais de restauration écologique par fauche et concurrence végétale à Laxou. 1ère Rencontre régionale pour une gestion intégrée des renouées invasives, Laxou, France, 11 juin
6. **Michelot, A.**, Gachet, S., Legay, M., Landmann, G. (2012). The project Traitaut : Functional traits and autoecology of forest tree species. Colloque international GICC 2012, Tours, France
7. **Michelot, A.**, Gachet, S., Legay, M., Landmann, G. (2012). Le projet TRAITAUT : TRAITs fonctionnels et AUTécologie des essences forestières. Ecoveg 8, Nancy, France
8. **Michelot, A.**, Etien, N., Bréda, N., Daux, V., Dufrêne, E., Gérémia, F., Pierre, M., Simard, S., Stievenard, M., Damesin, C. (2009). Analyse dendro-isotopique du fonctionnement de trois essences forestières face aux variations du climat. Journée GIS, Paris, France
9. Eglin, T., **Michelot, A.**, Delpierre, N., Maunoury-Danger, F., Dufrêne, E., François, C., Damesin, C. (2008). Seasonal variation in carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) in oak tree-rings: a functional modelling approach. JESIUM 2008, Giens, France
10. **Michelot, A.**, Eglin, T., Dufrêne, E., Lelarge-Trouverie, C., Damesin, C. (2008). Comparaison des variations saisonnières de l'efficacité d'utilisation de l'eau calculée à partir des flux et de la signature isotopique en ^{13}C des cernes dans une chênaie tempérée. JEF 2008, Montpellier, France

6.10. Outils informatiques

1. Plantureux, S., Amiaud, B., **Michelot-Antalik, A.**, Villerd, J., Noirtin, B., Pernot, M., Benchiheb, M. (2011-2016). Développement du système informatique eFLORAsys: <http://eflorasys.univ-lorraine.fr>

IV. Bilan des activités de recherche

Pendant mon doctorat et mon poste de chargée de mission au GIP ECOFOR, je travaillais sur l'impact du changement climatique sur la croissance et le fonctionnement des arbres forestiers avec une approche en écophysiologie végétale. Je coordonnais également des projets traitant de l'adaptation des forêts au changement climatique en renforçant le lien entre recherche et gestion. A mon arrivée au LAE en septembre 2013, j'ai effectué une **reconversion thématique** de mes recherches. J'ai construit une nouvelle activité de recherche au sein de l'équipe AGISEM (Agriculture Biodiversité Services écosystémiques et Evaluation multi-critères), en adéquation avec mon profil de recrutement et en collaboration avec Sylvain Plantureux. **Ce changement a nécessité une adaptation à l'étude des milieux ouverts et un passage à l'échelle des communautés.** Ce processus a pris plusieurs années afin de reconstituer un réseau de collaborations et de cibler des questions originales à traiter sur les agrosystèmes prairiaux. Il a été facilité par ma volonté de développer une approche intégrant l'étude des traits fonctionnels des plantes. J'ai développé mes connaissances sur cette approche lors de mon poste de Chargée de mission en échangeant avec mon encadrante Sophie Gachet (IMBE) pour mener le projet Traitaut et en participant en 2012 à l'Ecole Internationale des traits fonctionnels coordonnée par Eric Garnier et Marie-Laure Navas (CEFE). Mon activité au LAE s'est principalement centrée sur l'étude des relations entre pratiques agricoles, biodiversité végétale et services écosystémiques à l'échelle des communautés prairiales. Mes travaux de recherche, de 2007 à 2022, se sont ainsi portés sur quatre thématiques que je vais détailler par la suite :

- (1) effets du changement climatique sur les essences forestières ;**
- (2) évaluation multi-services des prairies ;**
- (3) étude fonctionnelle des interactions plantes-pollinisateurs ;**
- (4) restauration écologique par l'implantation d'espèces prairiales et valorisation de la biomasse.**

Pour chaque thématique, j'aborderai synthétiquement une partie « contexte » puis « démarche scientifique » avant de détailler les principaux résultats obtenus. Les parties conclusives « bilan et perspectives » expliqueront mon cheminement et les choix effectués pour la cohérence d'ensemble de mes travaux. Les publications associées seront ensuite listées avec leur nombre de citations. J'ai schématisé les disciplines, les échelles et les approches d'étude et ce qui réunit ces quatre thématiques en **Figure 2**.

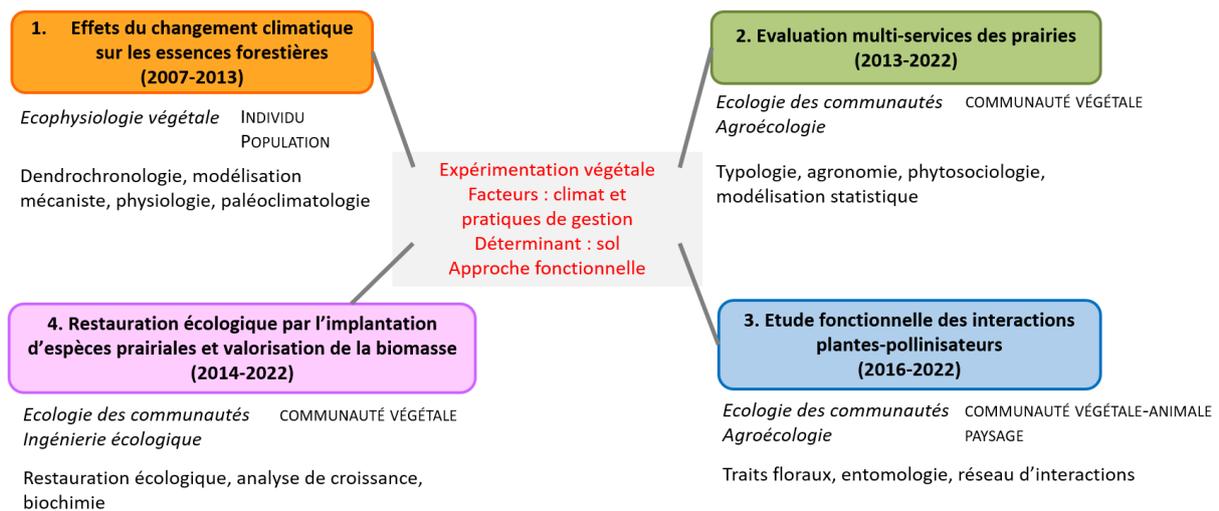


Figure 2. Schéma-bilan de présentation de mes thématiques de recherche et de la période principale d'activité associée. Les disciplines sont inscrites en italique, les échelles d'organisation en majuscule et les approches d'étude en police normale. Ce qui est commun aux quatre thématiques est inscrit en rouge au milieu du schéma.

Concernant mon positionnement au sein du LAE, pour le nouveau quinquennal de mon équipe (2017-2022), **j'ai été nommé responsable de l'animation scientifique** des travaux de l'axe 1 de l'équipe qui visent à étudier les relations entre pratiques agricoles, biodiversité et services écosystémiques dans les agrosystèmes. Je me suis investie avec mon collègue Christian Bockstaller dans la rédaction du nouveau projet d'équipe évalué par l'HCERES. **Depuis 2018, je co-anime les travaux de recherche de l'équipe AGISEM** avec Olivier Théron (directeur adjoint du LAE). En 2021, j'ai été nommée **responsable de deux techniciens INRAE** (Jodie Thénard et David Marcolet). Je m'assure du bon fonctionnement de leurs missions, je favorise leur complémentarité de compétences et leur épanouissement au sein du collectif et je mène leurs entretiens annuels. Depuis 2022, **je suis élue du collège B au conseil du Pôle Agronomie, Agroalimentaire, Forêt** à l'Université de Lorraine pour représenter le LAE.

1. Effets du changement climatique sur les essences forestières

1.1. Contexte

53 % des émissions de CO₂ actuelles sont fixées, en quantité à peu près égale, par les écosystèmes océaniques et terrestres (IPCC, 2007). Les forêts renferment 48 % du stock de carbone de la biosphère continentale (Beer et al., 2010). Les forêts tempérées représentent 24 % de la surface forestière mondiale et un stock de carbone d'environ 300 GtC (Robert & Saugier, 2003). Depuis 1850, leur productivité s'est fortement accrue mais depuis quelques années, cette tendance semble s'inverser sous l'effet d'une augmentation des contraintes liées aux changements climatiques (Ciais et al., 2005; Granier et al., 2007). Par exemple, les températures élevées et la forte sécheresse de 2003 ont nettement limité les entrées de carbone dans les forêts tempérées européennes durant l'été et celles-ci sont même temporairement devenues des sources de carbone. Afin de préserver les services écosystémiques rendus par les forêts et d'adapter l'aménagement et la gestion forestière aux changements climatiques, il est essentiel de mieux comprendre la réponse de chaque essence

aux facteurs environnementaux. Pour cela, il est nécessaire de trouver des archives physiologiques du carbone utilisé par les arbres pour leur croissance en lien avec les caractéristiques spécifiques de réponse à l'environnement.

1.2. Démarche scientifique

De 2007 à 2011 (stage de M₂ et thèse), mes recherches en écophysiologie végétale au sein du laboratoire Ecologie, Systématique et Evolution à l'Université Paris-Sud ont porté sur trois essences forestières très largement réparties en Europe (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* et *Pinus sylvestris*). J'ai utilisé des approches complémentaires de dendrochronologie, modélisation mécaniste, physiologie et paléoclimatologie. L'originalité de mon approche a été de considérer trois essences soumises aux mêmes variations climatiques, à deux échelles temporelles : inter et intra-annuelle et en utilisant deux indicateurs complémentaires : la **croissance et le $\delta^{13}\text{C}$ des cernes**. L'influence des différents types de sol (en composition, niveau de réserve utile en eau du sol et C/N) et de la compétition (facteur biotique) sur la réponse des essences a également été testée. Le $\delta^{13}\text{C}$ des cernes est utilisé en écologie comme indicateur du fonctionnement de l'arbre en réponse aux variations climatiques notamment. Il dépend de la discrimination foliaire contre le ^{13}C pendant la photosynthèse. Il indique ainsi l'efficacité d'utilisation de l'eau (production de biomasse/consommation en eau de la plante).

Dans un premier temps, j'ai étudié les réponses au climat et aux facteurs édaphiques en termes de croissance et de $\delta^{13}\text{C}$ des cernes de chaque essence sur les 50 dernières années. Afin de mieux interpréter les relations trouvées entre croissance, climat et bilan hydrique du sol, j'ai ensuite étudié à une échelle intra-annuelle comment se mettait en place la croissance du cerne en lien avec la phénologie foliaire et la dynamique des réserves carbonées. Pour cela, j'ai comparé entre décidus et sempervirents le développement anatomique du cerne, cette comparaison n'ayant jamais été réalisée auparavant. Cette analyse a révélé des différences interspécifiques d'allocation du carbone pour la croissance pouvant expliquer la sensibilité des essences au climat sur les 50 dernières années. Dans un troisième temps, pour mieux comprendre le lien entre la photosynthèse foliaire et l'information physiologique enregistrée à l'échelle du cerne, j'ai analysé le $\delta^{13}\text{C}$ des cernes intra-annuelle ($\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne). J'ai ainsi démontré que le $\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne était un intégrateur du fonctionnement foliaire pour les trois essences et qu'il caractérisait les dynamiques de gestion du carbone et de réponse au climat des arbres. Ces trois étapes m'ont donc amenée à des questionnements scientifiques, récapitulés dans la **figure 3**, utilisant différentes approches qui seront détaillées dans les paragraphes suivants.

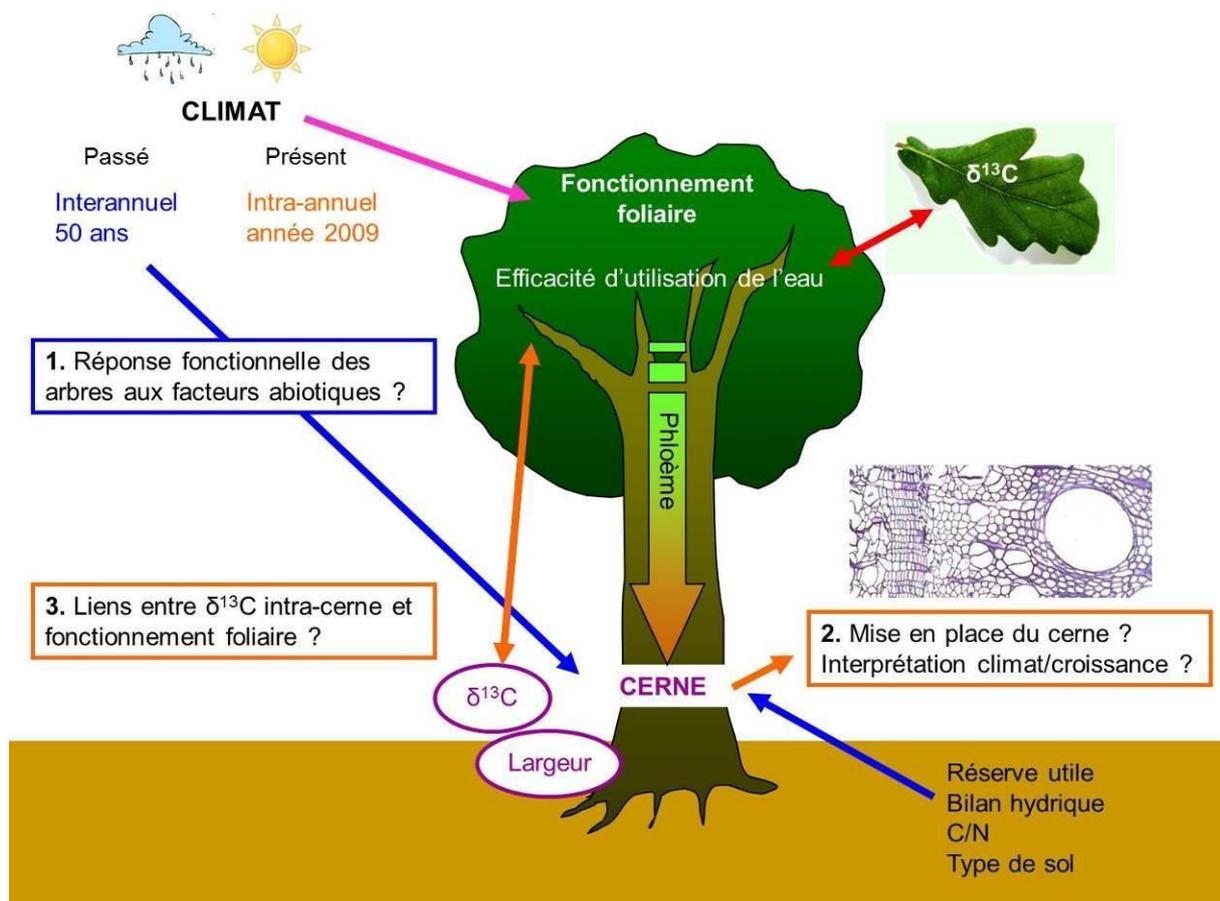


Figure 3. Schéma récapitulatif de mes travaux de stage de M2 et de thèse

1.3. Réponse climatique interannuelle de la croissance et du $\delta^{13}\text{C}$: approches dendrochronologique et paléoclimatique

Durant ma thèse, co-encadrée par Claire Damesin et Eric Dufrêne (ESE), j'ai examiné rétrospectivement **la réponse climatique et bioclimatique** des trois espèces en termes de croissance et de $\delta^{13}\text{C}$ des cernes. Ce travail s'est inscrit dans le cadre du projet AFOCLIM (Les arbres forestiers face aux variations du climat : comprendre le passé et prévoir le futur par l'analyse des cernes des arbres, 2008-2011). L'analyse de la croissance a été réalisée par une approche de type dendrochronologique. J'ai prélevé des carottes de tronc sur 3 parcelles par espèce et 15 arbres dominants par parcelle en forêt de Fontainebleau. Je suis allée travailler **deux mois à l'INRA de Nancy**, en collaboration avec l'équipe Phytoécologie forestière (UMR Silva) (Nathalie Bréda et François Gérémia), pour mesurer les largeurs de cernes sur chaque carotte de 1960 à 2007. J'ai ensuite appliqué les étapes de traitement de données dendrochronologiques : l'interdatation et la standardisation. A partir des résultats obtenus pour les largeurs de cernes, j'ai sélectionné 8 arbres par parcelle pour mesurer le $\delta^{13}\text{C}$ des cernes sur deux parcelles par espèce. Le $\delta^{13}\text{C}$ des cernes est utilisé en écologie comme indicateur du fonctionnement de l'arbre mais également comme indicateur du climat en **paléoclimatologie**. Le travail en laboratoire (découpe, broyage et extraction de la cellulose) a ainsi été réalisé au LSCE avec lequel j'ai collaboré (Valérie Daux, Monique Pierre et Michel Stievenard). Puis, j'ai analysé les **corrélations bootstrap** de la croissance interannuelle et du

$\delta^{13}\text{C}$ des cernes sur chaque parcelle avec les variables climatiques d'une part, en utilisant le logiciel Dendroclim, et les **variables de déficit hydrique en eau du sol** d'autre part, que j'ai simulées grâce au **modèle BILJOU@** (Granier et al., 1999).

Les résultats ont montré une **vulnérabilité commune** de la croissance et du $\delta^{13}\text{C}$ des cernes des trois essences aux faibles précipitations de mai à juillet mais également des **différences interspécifiques**. Le Hêtre est l'essence la plus sensible au climat de l'année. Le Chêne est sensible aux automnes secs et froids de l'année précédente ce qui montre l'impact des arrières-effets climatiques sur la croissance. La croissance du Pin est favorisée par les hivers chauds mais diminuée par les fortes températures estivales et les déficits hydriques de juin à août. La croissance de ces trois essences sera donc probablement négativement impactée par les changements climatiques futurs (**publications 1 et 2**).

1.4. Suivi de la croissance radiale intra-annuelle : approches anatomique et biochimique

Afin de mieux interpréter les relations trouvées entre croissance, climat et bilan hydrique, un **suivi hebdomadaire de la croissance radiale** en 2009 a été réalisé en forêt de Fontainebleau. Cinq arbres par parcelle ont été suivis sur une parcelle par espèce. Sur chaque arbre, j'ai mesuré différents **traits structuraux** : la hauteur, la circonférence, l'aire du houppier, l'indice de compétition et des traits foliaires : la masse surfacique et les teneurs en azote et en chlorophylle. J'ai observé la **phénologie foliaire** et mesuré la croissance hebdomadaire par des dendromètres manuels et à partir de micro-carottes. Pour réaliser l'analyse des micro-carottes, j'ai travaillé deux mois à l'INRA de Nancy en collaboration avec l'équipe Croissance, Production et Qualité des bois (UMR Silva, Cyrille Rathgeber) et Sonia Simard (Université du Québec à Chicoutimi). J'ai également mesuré les réserves carbonées en avril, juin et août 2009 par des analyses biochimiques (enzymologie) en laboratoire à partir de carotte de tronc. Le **microclimat** de chaque parcelle a été suivi par l'implémentation de pluviomètres et des mesures d'humidité pondérale du sol.

Les résultats ont mis en évidence des **différences interspécifiques d'allocation du carbone**. La croissance du Hêtre commence juste après le débourrement et son taux maximal de croissance a lieu lorsque les feuilles sont matures et les concentrations en réserves varient peu. Pour le Chêne, le bois initial est rapidement développé avant le débourrement, ce qui conduit probablement à la diminution de l'amidon mesurée dans le tronc d'Avril à Juin. Pour le Pin, la croissance commence avant la sortie des aiguilles et l'absence de diminution des réserves suggère que les substrats pour la croissance radiale sont les assimilats nouvellement synthétisés par les aiguilles de l'année précédente. Pour les trois essences, la largeur du cerne est influencée par la durée de croissance mais pas par le taux de croissance ce qui diffère des études précédentes dans d'autres types climatiques (**publication 3**).

1.5. Etude du $\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne de trois essences : approche physiologique et modélisation mécaniste

Durant mon stage de M₂ et ma thèse, j'ai étudié le $\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne pour mieux comprendre le lien entre la **photosynthèse** foliaire et l'information physiologique enregistrée à l'échelle du cerne. La première étude visait à rechercher si le $\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne était un indicateur de l'efficacité d'utilisation de l'eau à l'échelle foliaire (WUEi) et de l'efficacité d'utilisation de l'eau

écosystémique (WUE). Elle a été menée sur 8 chênes en forêt de Barbeau puisque les flux de carbone et d'eau y sont mesurés en continu (site FLUXNET), contrairement au site de Fontainebleau. En collaboration avec Thomas Eglin, j'ai **créé un modèle** pour comparer le $\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne 2006 avec la WUEi simulée par le modèle mécaniste CASTANEA (Dufrêne et al., 2005) et avec les mesures de la WUE écosystémique. Les résultats ont montré une forte **variabilité intra-spécifique** du $\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne des chênes que j'ai pu **relier à l'indice de compétition**. Les corrélations entre la WUEi foliaire, la WUE écosystémique et le $\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne suggèrent que le bois final est un indicateur intra-annuel du fonctionnement foliaire (**publications 4 et 5**).

Ces résultats m'ont incitée à identifier la **part d'influence climatique et celle de la dynamique interne du carbone** dans le signal du $\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne. Mon objectif était de déterminer si le $\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne était un indicateur du fonctionnement foliaire pour d'autres espèces que le Chêne. J'ai ainsi monté une expérience en forêt de Fontainebleau en 2009 où j'ai comparé les dynamiques de $\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne du Hêtre, du Chêne et du Pin au $\delta^{13}\text{C}$ des sucres de la sève phloémienne et des réserves carbonées. Le $\delta^{13}\text{C}$ du phloème a été utilisé comme indicateur du fonctionnement foliaire (Rascher et al., 2010). Le $\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne de la cellulose et les variations saisonnières du $\delta^{13}\text{C}$ du phloème ont été mesurés sur 5 arbres par parcelle également suivis en croissance intra-annuelle. Les résultats ont montré que les dynamiques du $\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne et du $\delta^{13}\text{C}$ du phloème sont proches pour les trois espèces. Ils indiquent peu d'utilisation des réserves pour le Hêtre en début de croissance contrairement au Chêne. Le $\delta^{13}\text{C}$ intra-cerne des pins est un très bon indicateur des variations intra-annuelles de l'humidité de l'air.

Ces différentes approches m'ont permis de présenter une analyse intégrative du fonctionnement des trois essences en forêt tempérée. Les informations fournies par les cernes permettent d'appréhender la **survie des espèces face aux changements climatiques futurs** et peuvent être utilisées pour comprendre le dépérissement lié à ces changements.

1.6. Post-doctorat : compréhension fonctionnelle du dépérissement des hêtres

J'ai pu mettre à profit ces résultats immédiatement après ma thèse, en les appliquant à l'étude du **dépérissement du Hêtre** au cours d'un post-doctorat de 3 mois au laboratoire ESE avec Claire Damesin. Ce dépérissement, en grande partie imputé aux changements climatiques, est au cœur des préoccupations de **l'aménagement des forêts et de leur gestion**. Grâce aux outils développés pendant ma thèse et à des mesures biochimiques de la quantité des réserves carbonées et de leur $\delta^{13}\text{C}$, j'ai identifié les **mécanismes physiologiques** altérés lors du dépérissement d'une parcelle de hêtres en forêt de Fontainebleau.

Les résultats ont montré une **diminution significative du taux et de la durée de croissance** radiale chez les hêtres dépérissants comparés aux hêtres sains. Pendant la période comprise entre le débourrement et le taux maximal de croissance, nous avons mis en évidence une augmentation de la concentration d'amidon pour les hêtres dépérissants seulement, ce qui révèle **un compromis entre croissance radiale et stockage d'amidon** (**publication 6**).

La thèse m'a permis de confirmer **mon goût pour la recherche expérimentale *in-situ* ou en laboratoire**. Elle m'a donné de solides bases en termes d'échanges scientifiques, de débats, d'observations, de mise en place de protocoles, d'analyses de données et d'écriture de projets. Les **collaborations y ont été nombreuses et très diversifiées**, touchant à différentes approches ou thématiques : modélisation, dendrochronologie, physiologie, paléoclimatologie, gestion forestière. Mes quatre années d'enseignement (monitrice puis ATER) m'auront également aidée à acquérir **une vision large de l'écologie dans différents habitats** (terrestres et aquatiques), dans **différentes approches** (évolutive et fonctionnelle) et sous différents formats pédagogiques (sorties botaniques, TP, TD, cours magistraux).

Mes travaux ont montré une sensibilité de la croissance et du $\delta^{13}\text{C}$ des cernes des trois essences (Hêtre, Chêne sessile et Pin sylvestre) aux sécheresses estivales. La croissance du Hêtre est la plus réactive au climat d'une année à l'autre ce qui peut être expliqué par une forte dépendance de la croissance au fonctionnement foliaire et une faible utilisation des réserves carbonées pour assurer le début de la croissance. Les arrières-effets du climat peuvent diminuer la croissance du Chêne qui est sensible aux sécheresses de l'automne précédent, contrairement aux deux autres espèces. Ce processus résulte de l'utilisation importante de réserves carbonées par rapport aux assimilats pour la croissance du bois initial. La croissance du Pin a une durée plus longue que celle des décidues et elle est sensible au climat de juin à août. Le $\delta^{13}\text{C}$ des cernes de pins est celui qui enregistre le plus la réponse au VPD probablement du fait d'une forte sensibilité de la conductance stomatique à ce paramètre. Ces résultats contrastés entre espèces à différentes résolutions temporelles (inter et intra-annuelle) permettent d'appréhender la survie des espèces face au changement climatique et peuvent être utilisés pour comprendre le dépérissement lié à ce changement. **Ces connaissances acquises sur l'effet du changement climatique sur les peuplements végétaux pourront être remobilisées pour mon projet afin d'assurer la pérennité des communautés végétales dans les agrosystèmes.**

Durant ma thèse j'ai constaté parfois le manque d'interactions entre les chercheurs qui étudient la réponse des écosystèmes aux changements climatiques et les gestionnaires forestiers qui ont besoin de ces résultats afin d'adapter leurs choix sylvicoles d'aménagement. Avec l'incertitude des scénarios climatiques, penser la forêt de demain avec plusieurs décennies d'avance (par exemple, 30 ans de rotation pour les pins sylvestres, 80 ans pour les chênes sessiles) est un challenge important. En termes de choix d'essences plusieurs stratégies peuvent s'envisager comme :

- diversifier les provenances en place pour augmenter la résilience aux aléas climatiques puis sélectionner des provenances résistantes au changement climatique ;
- augmenter le nombre d'essences différentes en installant des mélanges d'essences sur une même parcelle ou des mélanges de peuplements purs diversifiés à l'échelle du paysage ;
- planter des essences autochtones par la méthode de la migration assistée.

J'ai donc souhaité volontairement me réorienter sur des projets de recherche et de développement en écologie qui répondent plus directement aux attentes des gestionnaires.

Dès la fin de mon post-doctorat au CNRS, j'ai obtenu un poste de chargée de mission au GIP (Groupement d'Intérêt Public) Ecofor à Paris correspondant à mon projet.

Publications

1. **Michelot A.**, Bréda N., Damesin C., Dufrêne E. (2012). Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. *Forest Ecology and Management*, 265 (186 citations)
2. Daux, V., **Michelot-Antalik, A.**, Lavergne, A., Pierre, M., Stievenard, M., Bréda, N., Damesin, C. (2018). Comparisons of the performance of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of *F. sylvatica*, *P. sylvestris* and *Q. petraea* in the record of past climate variations. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences.*, 123 (4) (20 citations)
3. **Michelot A.**, Simard S., Rathgeber C., Dufrêne E., Damesin C. (2012). Comparing the intra-annual wood formation of three European species (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*) as related to leaf phenology and non-structural carbohydrate dynamics. *Tree physiology*. 32 (8) (321 citations)
4. Eglin T., François C., **Michelot A.**, Delpierre N., Damesin C. (2010). Linking intra-seasonal variations in climate and tree-ring $\delta^{13}\text{C}$: a functional modelling approach. *Ecological Modelling*, 221 (36 citations)
5. **Michelot A.**, Eglin T., Dufrêne E., Lelarge-Trouverie C., Damesin C. (2011). Comparison of seasonal variations in water-use efficiency calculated from the carbon isotope composition of tree rings and flux data in a temperate forest. *Plant Cell and Environment*, 34 (48 citations)
6. **Michelot-Antalik, A.**, Granda, E., Fresneau, C., Damesin, C. (2019). Evidence of a seasonal trade-off between growth and starch storage in declining beeches: assessment through stem radial increment, non-structural carbohydrates and intra-ring $\delta^{13}\text{C}$. *Tree Physiology*, 39 (5) (5 citations)

1.7. Adaptation des forêts au changement climatique

Le GIP Ecofor est un organisme qui joue le rôle d'interface entre recherche et gestion forestière. Il compte 12 membres parmi les principaux organismes forestiers et l'État représenté par les deux ministères chargés de l'agriculture et de la forêt d'une part et de la transition écologique d'autre part. Arrivée au GIP Ecofor en février 2012, j'ai coordonné des **projets R&D multipartenaires** sur l'adaptation des forêts aux changements climatiques à l'interface entre recherche et gestion. Le projet Traitaut (TRAITS fonctionnels et AUTécologie des essences forestière, co-encadré par Sophie Gachet (IMBE), Myriam Legay (ONF) et Guy Landmann (GIP Ecofor), qui s'est achevé en février 2013, a réuni chercheurs et aménagistes dans le but de rénover l'étude de la réponse des essences forestières aux facteurs abiotiques dans le contexte des changements climatiques. Un site internet a été créé par Wilfried Heintz (Gip Ecofor) et moi-même pour rassembler les acteurs et constituer une base de publications sur l'autécologie de nombreuses essences. L'apport potentiel des **traits fonctionnels** a été analysé *via* la consultation de la base mondiale TRY (Kattge et al., 2011). Ce projet a souligné la nécessité de rénover les approches pour adapter les forêts au changement climatique selon différentes pistes :

- le développement d'une approche analytique séparant les effets des variables de sol et de climat ;
- l'utilisation de variables biologiques (de phénologie, physiologie, distribution) reliées quantitativement aux facteurs abiotiques ;
- la quantification des seuils de réponse des essences aux facteurs abiotiques ;
- l'élaboration d'outils informatiques opérationnels.

Un cahier des charges pour un outil d'aide à la décision pour l'adaptation des forêts au changement climatique a été établi (Figure 4).



Figure 4. Schéma présentant le cahier des charges simplifié pour un outil d'aide à la décision pour l'adaptation des forêts au changement climatique

Le projet Traitaut a ainsi été le point départ d'un **pré-projet ANR (Sofora)** visant à l'élaboration d'un outil d'aide à la décision (choix des essences, diversité des espèces et traitement sylvicole) pour les gestionnaires forestiers face au changement global (**publications 7 et 8**). Cette pré-proposition, dans laquelle j'étais pleinement impliquée (rédaction et coordination) a été sélectionnée en première mais pas en deuxième phase d'évaluation. Elle proposait une **approche résolument pluridisciplinaire** impliquant l'écologie, la climatologie, l'économie et les sciences sociales.

A partir de février 2013, j'ai coordonné le projet Sicfor (Du Suivi aux Indicateurs de Changement climatique en FORêt) dont les objectifs étaient de développer une **démarche méthodologique** qui permette de sélectionner des indicateurs variés et représentatifs du changement climatique en forêt. Cette démarche est en lien avec celle de l'Observatoire National du Réchauffement Climatique (ONERC) sur d'autres milieux comme les **agrosystèmes** et s'appuie sur celle des **indicateurs de biodiversité** forestière menée au Gip Ecofor depuis plusieurs années. Ces indicateurs servent à mettre en valeur les réseaux d'observation et à **sensibiliser** le public et les décideurs (**publication 9**).

Bilan et perspectives

Ces travaux au sein du Gip Ecofor m'ont permis de **coordonner des projets liés à la gestion et à l'aménagement du territoire** et de présenter des conférences issues de mon expertise sur

différents sujets. J'ai pu développer des compétences de communication en animant et en organisant les échanges entre experts. Je me suis rapprochée des préoccupations des acteurs de la gestion forestière comme l'ONF ou le CNPF tout en collaborant avec des chercheurs de toute la France et de la Belgique sur ces questions d'adaptation. Les résultats montrent la nécessité de **mieux intégrer les approches fonctionnelles** à l'écologie forestière et de penser l'aménagement forestier pour la résilience au changement climatique en **diversifiant davantage les essences**.

Les connaissances acquises sur les liens entre recherche et gestion, les traits fonctionnels et l'utilisation des indicateurs seront précieuses pour la mise en place de mon projet et notamment le changement d'échelle dans l'étude des services écosystémiques de la parcelle au territoire.

Deux considérations majeures m'ont fait postuler à des postes de maître de conférences et quitter le GIP Ecofor en août 2013 :

- le souhait de **mener des travaux expérimentaux *in* ou *ex-situ*** ;
- la volonté de **transmettre les connaissances acquises et l'expérience aux étudiants *via* l'enseignement**.

Publications

7. **Michelot-Antalik, A.**, Gachet, S., Legay, M., Landmann, G. (2014). Vers un outil d'aide à la décision pour l'adaptation des forêts françaises au changement climatique. Forêt Entreprise. 217.
8. **Michelot-Antalik, A.**, Gachet, S., Legay, M., Landmann, G. (2014). Vers un outil d'aide à la décision pour l'adaptation des forêts françaises au changement climatique. Innovations Agronomiques, INRA, 41.
9. Asse, D., **Michelot-Antalik, A.**, Landmann, G. (2014). Projet SICFOR. Du suivi aux indicateurs de changement climatique en forêt. Paris : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt - GIP Ecofor. Rapport final, 102 p.

2. Evaluation multi-services des prairies

Lorsque j'ai candidaté à des postes de maîtres de conférences, aucun profil n'était proposé en écophysiologie forestière. Cependant deux profils ont retenu mon attention : l'un à l'Université de Bretagne Occidentale - IUT Brest en génie biologique et sciences agronomiques, l'autre à l'Université de Lorraine – ENSAIA en agroécologie. J'ai été retenue pour l'oral à ces deux postes et j'ai préparé du mieux possible les concours. A ma grande surprise, j'ai été classée première aux deux et il a fallu choisir. **Travailler sur les prairies permanentes à l'échelle des communautés est une thématique qui m'a toujours intéressée**. Sur les bancs d'amphi de l'Université Paris sud les cours à ce sujet me passionnaient. Quitter la forêt pour m'ouvrir à la prairie m'a semblé être une décision cohérente avec ma vision de l'écologie et de ces échelles d'organisation emboîtées. Le projet que j'ai présenté pour le poste en 2013 est présenté en **Figure 5**. Finalement, 9 ans plus tard, il est très proche de ce que je réalise aujourd'hui au laboratoire.

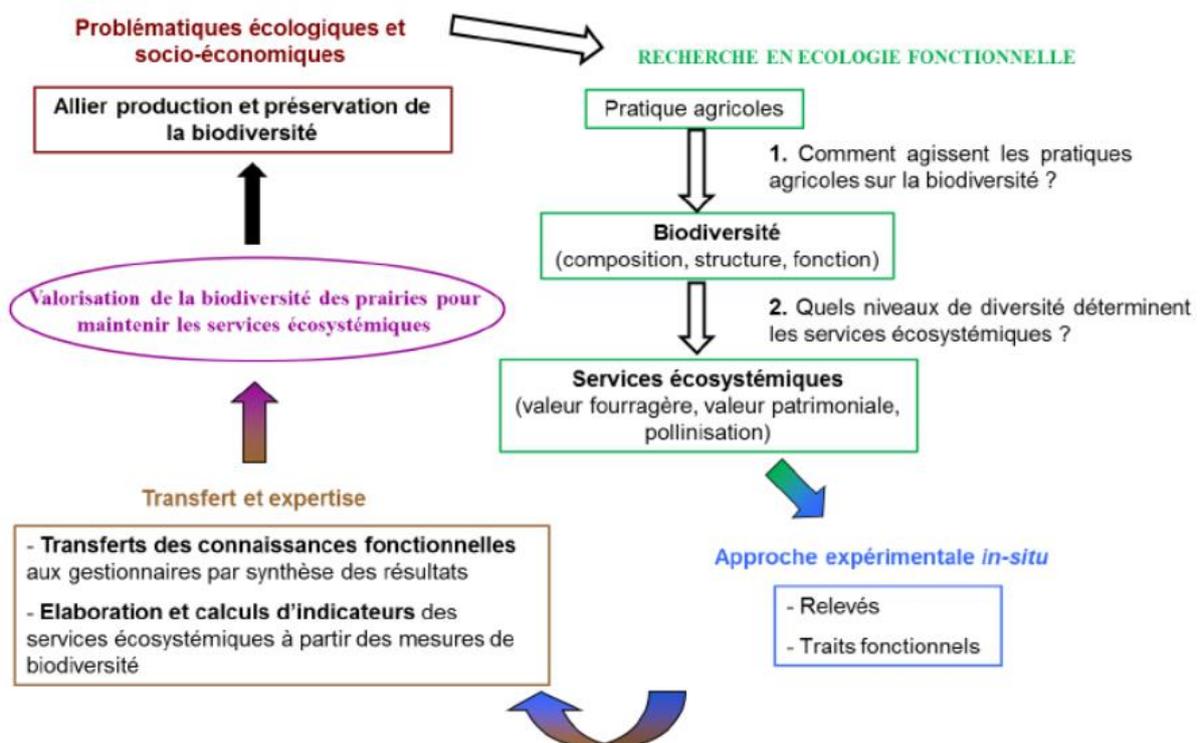


Figure 5. Projet de recherche présenté dans mon dossier de concours au poste de maître de conférences en agroécologie à l'Université de Lorraine en 2013.

En septembre 2013, j'ai ainsi commencé mon poste de maître de conférences au Laboratoire Agronomie et Environnement à Nancy (UMR 1121, Université de Lorraine, INRAE). Mes premières années ont été marquées par la préparation des enseignements qui est très chronophage. Concernant la recherche, j'ai dû m'adapter à ma nouvelle thématique. Sylvain Plantureux a partagé son expérience sur l'agronomie des prairies pour que cela se passe du mieux possible. **La difficulté principale a été de recréer un réseau de collaborateurs**, difficulté que je n'avais pas forcément anticipée. En six ans de recherche sur les forêts, j'avais créé beaucoup de contacts et de collaborations fructueuses. Lorsque je me rendais en séminaire il était très appréciable de connaître les chercheurs, les gestionnaires et même les décideurs travaillant sur les écosystèmes forestiers. A mon premier colloque sur les prairies, je ne connaissais personne. Ce ne fût pas un problème mais cela m'a pris un peu de temps de recréer des collaborations et des échanges scientifiques stimulants sur cette nouvelle thématique que je vais présenter par la suite.

Intégration dans l'équipe Agriculture Durable

L'enjeu principal de l'équipe Agriculture Durable (devenue l'équipe AGISEM en 2016) résidait dans la production de nouvelles connaissances sur les relations entre i) pratiques de gestion des systèmes agricoles et du paysage, ii) biodiversité et iii) services écosystémiques. Ces connaissances pouvaient être utilisées pour la conception de nouveaux systèmes agricoles, de cultures et de gestion de prairies. Nous les mobilisons pour le développement de méthodes et d'outils d'évaluation utiles pour accompagner les acteurs de l'agriculture à concevoir des systèmes innovants basés sur l'agroécologie et conduire une transition agroécologique (Duru et al., 2015).

Mes activités se sont structurées plus particulièrement dans l'axe 1 : "**Relations entre pratiques agricoles, biodiversité et services écosystémiques de la parcelle au paysage**". Cet axe, dont je portais l'animation scientifique et que j'ai représenté en **Figure 6**, avait pour objectif d'étudier i) l'influence des peuplements végétaux sur les communautés animales et microbiennes ii) l'influence des pratiques agricoles et des éléments du paysage sur la biodiversité et les services écosystémiques associés.

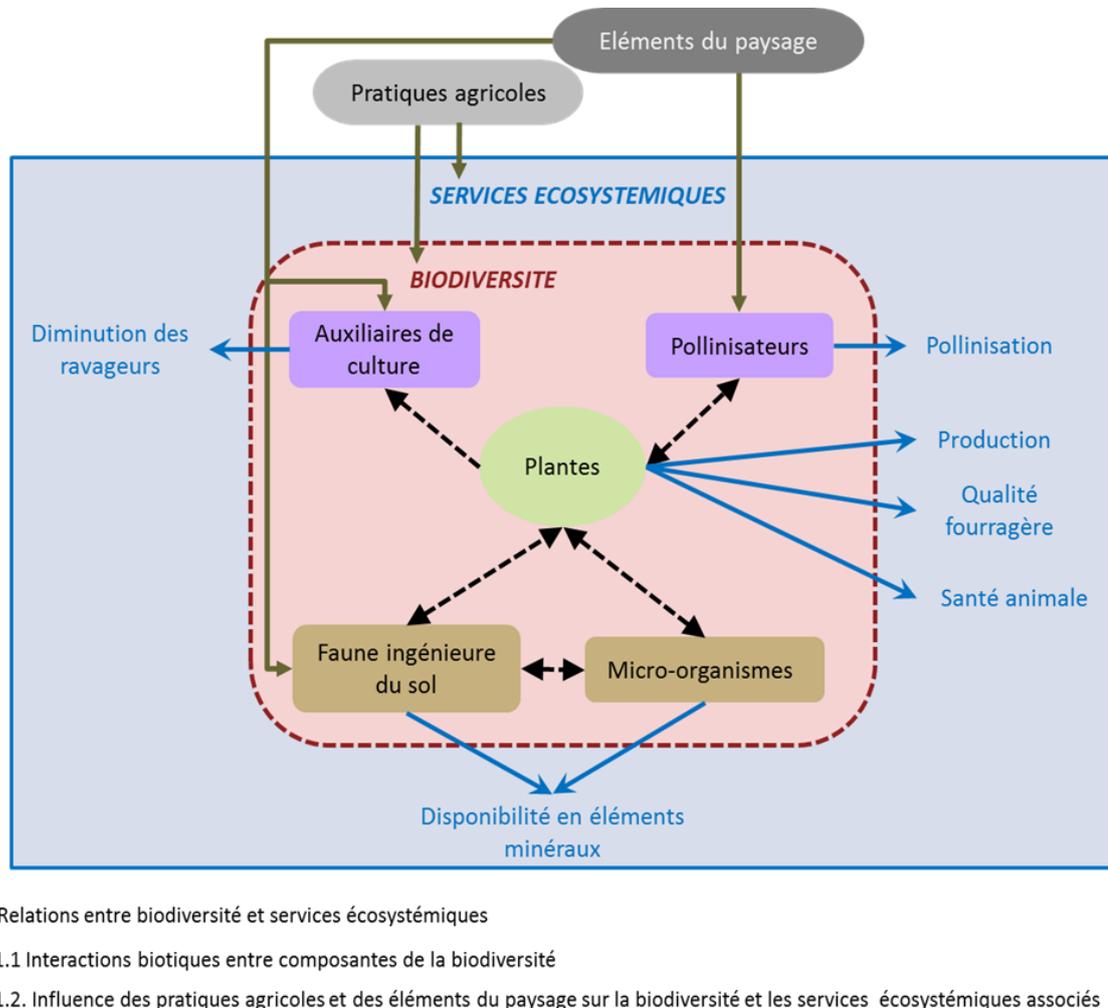


Figure 6. Cadre conceptuel des travaux de l'axe 1 de l'équipe agriculture durable en 2016.

2.1. Contexte

Dans ce document, **je me placerai dans le cadre de la typologie EFSE** (Evaluation Française des Services Ecosystémiques, Théron et al., 2017) qui définit les services écosystémiques comme des processus écologiques ou des éléments de la structure de l'écosystème dont l'Homme dérive des avantages. Ces services sont influencés par des **déterminants** biophysiques (état d'entité, structure, processus) présents dans l'écosystème et par des facteurs de changement comme les pratiques agricoles ou le changement climatique. Pour initier mes recherches au LAE et m'insérer dans les thématiques de l'équipe, je me suis intéressée à l'évaluation des services écosystémiques associés aux prairies permanentes. **Les prairies permanentes sont des agrosystèmes qui couvrent un tiers de la surface agricole**

utile (SAU) en France comme en Europe (Huyghe et al., 2014). Elles jouent de ce fait un rôle majeur dans l'alimentation animale, mais elles sont aussi à l'origine de nombreux autres services écosystémiques comme la pollinisation ou le stockage de carbone. Elles sont au cœur des enjeux d'équilibre agri-écologique qui visent à favoriser des milieux dont les fonctions agricoles s'appuient sur une forte biodiversité, et dont les pratiques agricoles maintiennent les fonctions écologiques (Pottier et al., 2012). Ainsi, les habitats¹ prairiaux contiennent la moitié des espèces de la flore Européenne (Veen et al., 2014), et le maximum de richesse spécifique (89 plantes.m⁻²) est même atteint dans des prairies permanentes en milieu tempéré (Wilson et al., 2012).

Ces caractéristiques ont conduit l'Union Européenne à mettre en place une politique volontariste pour maintenir ces surfaces en herbe. En effet, au cours des 50 dernières années **les surfaces prairiales en Europe ont diminué de 10 millions d'hectares** (Huyghe et al., 2014). Les prairies permanentes représentent 64 % des surfaces fourragères et 45 % de la production fourragère en France en 2020 (Agreste 2020). Leur surface a tendance à diminuer (-30 % entre 1973 et 2001) de façon plus conséquente que la diminution des surfaces agricoles totales (- 9 % de SAU, entre 1973 et 2001) (Amiaud, 2016). Leur dynamique de déclin est cependant différente suivant les régions avec des régions où la surface de prairies permanentes (STH) par rapport aux surfaces fourragères principales (SFP) est restée constante entre 1973 et 2001 dans un contexte de forte diminution du ratio SFP/SAU (par exemple en Picardie) et d'autres régions où le ratio STH/SFP a fortement diminué avec un ratio SFP/SAU qui a diminué (par exemple en Bretagne). Ces différences régionales sont liées au contexte agricole (polyculture, viticulture, élevage intensif ou extensif...) et au changement d'occupation des sols. Les principales causes de la diminution des prairies permanentes à l'échelle européenne sont **l'abandon des surfaces** (zones méditerranéennes, montagneuses, continentales) qui s'enfrichent (installation de végétation ligneuse) et **l'intensification agricole**, particulièrement au nord-ouest de l'Europe. L'intensification entraîne des pratiques de gestion qui diminuent la diversité des plantes (fertilisation azotée, fauche précoce et fréquente, surpâturage) (Gaujour et al., 2012) et le retournement des prairies permanentes au profit des cultures de vente ou de surfaces fourragères plus productives comme le maïs ensilage ou les prairies temporaires.

2.2. Démarche scientifique

Face aux aléas, comme le changement climatique ou l'irrégularité de la rentabilité économique, et puisque leur production peut se faire sans intrant chimique, **les prairies permanentes sont des modèles privilégiés pour l'étude de la transition agroécologique**. Les exploitants ont cependant parfois des difficultés à gérer ces agrosystèmes diversifiés qui peuvent contenir des associations végétales très différentes et demandent des pratiques de gestion adaptées. Les communautés prairiales sont des assemblages d'espèces qui vivent simultanément dans une aire donnée et qui interagissent. Les communautés réalisées résultent du concept des filtres environnementaux complété par Lortie et al. (2004) à partir de travaux de Grime (1998), Krebs (1994) et Laakso et al. (2001). Les filtres successifs qui

¹ Ensemble de facteurs biotiques et abiotiques qui constituent le milieu et offrent les ressources suffisantes pour permettre à une population ou à une communauté de vivre et se reproduire

s'appliquent au pool d'espèces régional (**Figure 7**) pour constituer un pool d'espèces locales plus restreint sont :

- le **filtre de dispersion** (qui dépend notamment des capacités de dispersion des graines et des distances entre sites)
- le **filtre environnemental** (conditions climatiques et pédologiques, niveau de ressources et pratiques de gestion : fauche, pâturage et fertilisation)
- le **filtre biotique** (compétition, facilitation entre espèces végétales, pollinisation, herbivorie, interaction indirecte²).

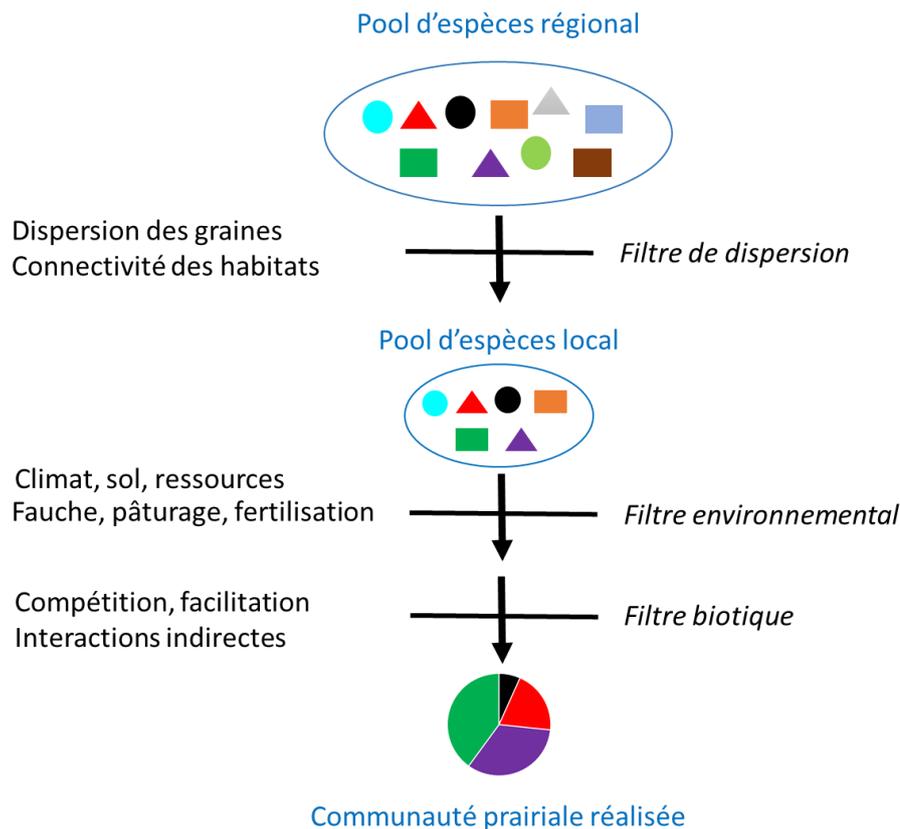


Figure 7. Schéma du concept des filtres environnementaux appliqués aux communautés prairiales.

Pour évaluer la diversité des communautés prairiales, j'ai utilisé **deux approches : taxinomique et fonctionnelle**. La diversité taxinomique peut être divisée en richesse spécifique (nombre d'espèces différentes dans la communauté) et équitabilité (régularité de la distribution des espèces dans la communauté). Des indices de diversité taxinomique comme Simpson ou Shannon-Weaver combinent ces deux composantes. L'approche fonctionnelle consiste à identifier la diversité des fonctions réalisées par les individus d'une communauté en mesurant leurs caractéristiques. **Ces caractéristiques morphologiques, physiologiques ou phénologiques mesurables sur un individu [...] sans référence à un environnement ou à un autre niveau d'organisation, sont appelés des traits fonctionnels** (Violle et al., 2007). Cette

²Interaction entre les espèces dans lesquelles l'une d'entre elles, par une interaction directe avec une autre ou à cause d'une modification des ressources, altère l'abondance d'une troisième espèce qui n'interagit pas directement. Les interactions indirectes peuvent être trophiques ou non (Triplet, 2020).

approche permet de comparer le fonctionnement de différentes communautés végétales et de relier plus facilement la diversité des communautés aux fonctions qu'elles réalisent. Des exemples de traits mesurés sur les plantes et la fonction qu'ils peuvent indiquer sont montrés en **Figure 8**. Ces mesures de traits et leur standardisation se sont beaucoup développées ces trois dernières décennies notamment sur les caractéristiques végétatifs et foliaires. Par exemple, la surface foliaire spécifique (SLA, ratio de la surface foliaire sur le poids sec des feuilles) est positivement corrélée au taux de croissance des plantes. La teneur en matière sèche des feuilles (LDMC, ratio du poids sec des feuilles sur le poids sec des feuilles à saturation en eau) est corrélée négativement à la vitesse de décomposition de la litière.

A l'échelle des communautés végétales, ces traits fonctionnels peuvent avoir un impact supérieur à la richesse spécifique et peuvent influencer les propriétés³ écosystémiques selon deux hypothèses :

- **l'hypothèse de dominance ou mass-ratio** (Díaz et al., 2007) qui énonce que ce sont les traits des espèces dominantes qui influencent les propriétés de l'écosystème. Ainsi, ces propriétés dépendent de la valeur moyenne des traits dans la communauté pondérée par l'abondance de chaque espèce, **autrement appelée CWM** (community weighted mean). Elle a été vérifiée pour des propriétés comme la productivité primaire, la décomposition de la litière ou les composantes des cycles du carbone et de l'eau ;

- **l'hypothèse de complémentarité de niches** (Mason et al., 2005) qui énonce que la présence d'espèces complémentaires pour l'utilisation des ressources influence les propriétés écosystémiques. Ainsi, d'une grande diversité de traits découlerait une différenciation des niches écologiques qui entrainerait une diminution de la compétition et une complémentarité entre espèces dans l'acquisition des ressources. **Elle a été vérifiée pour les services de régulation comme la pollinisation des espèces cultivées ou la régulation des ravageurs par conservation**. Les mesures de diversité fonctionnelle permettent d'évaluer cette étendue de diversité des valeurs de traits à l'échelle des communautés. Nous en reparlerons dans la partie 3 de ce document.

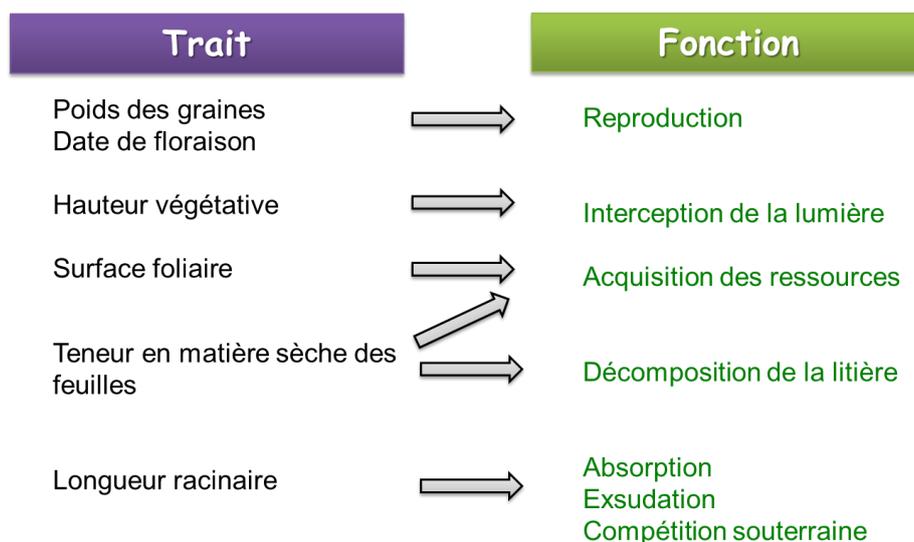


Figure 8. Exemples de traits végétatifs reliés à des fonctions écosystémiques.

³Fonction, bien ou service rendu par les écosystèmes.

Ainsi mes travaux se sont d’abord centrés sur l’étude de ces communautés végétales et particulièrement sur les relations entre leur composition et le climat, le sol et les pratiques de gestion. Ensuite, l’objectif était d’analyser les liens entre la biodiversité de ces communautés prairiales et les services écosystémiques qu’elles fournissent. Le **Tableau 2** liste les principaux biens, services écosystémiques et patrimoines naturels liés aux prairies permanentes selon la typologie EFESE (Thérond et al., 2017). Lorsque je suis arrivée au laboratoire et les années suivantes, certaines propriétés étaient étudiées en prairie permanente au sein de l’équipe (indiqués en bleu dans le tableau). J’ai ainsi collaboré avec Sylvain Plantureux, Anne Poutraud, Geoffrey Mesbahi (LAE) et Bernard Amiaud (UMR Silva) sur cette thématique d’évaluation des services écosystémiques liés aux prairies dès 2015.

Tableau 2. Biens, services écosystémiques et patrimoines principaux associés aux prairies permanentes selon la typologie EFESE. En bleu sont indiqués les propriétés étudiées au LAE sur les prairies permanentes.

Catégories	Dénomination
Biens produits par les écosystèmes	Production de fourrages
	Production de plantes sauvages à d’autres fins que les fourrages
	Production de molécules pour la santé animale
	Production de biens animaux
Services de régulation	Régulation de la qualité de l’eau
	Pollinisation
	Régulation des ravageurs
	Fourniture en éléments nutritifs
Services culturels	Régulation du climat et stockage de carbone
	Potentiel récréatif
	Aménités paysagères
	Education
Patrimoine naturel	Espèces et sites protégés
	Patrimoine spirituel et identitaire

Plus précisément, j’ai étudié l’effet de la diversité végétale sur deux biens et un service : la production de molécules pour la santé animale, la production de fourrages et la pollinisation. Cette approche analysant le continuum facteur-déterminant-biens/services dans les prairies permanentes est schématisée dans la **Figure 9**. Elle a été réalisée à travers différents projets, présentés par la suite, dont l’objectif était l’évaluation de plusieurs biens et services écosystémiques.

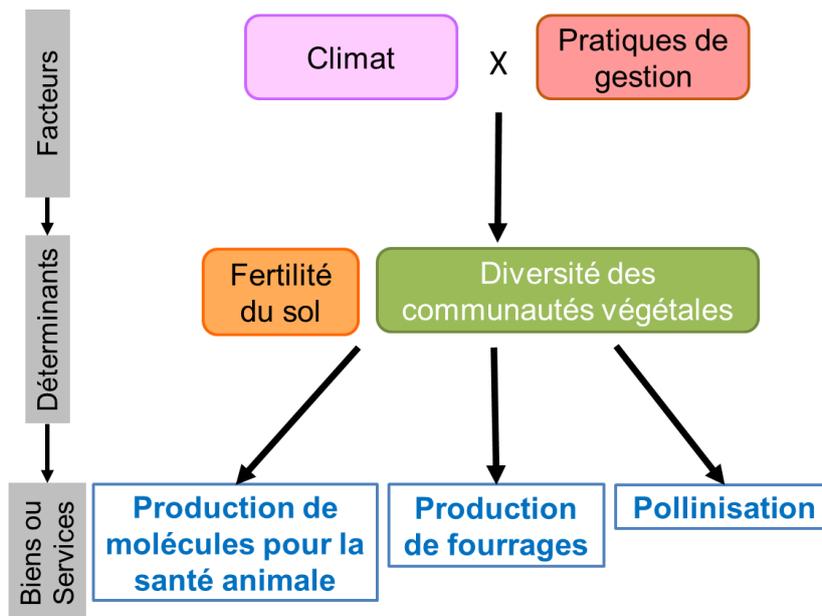


Figure 9. Schéma des relations étudiées pour l'évaluation multi-services des prairies selon le cadre conceptuel EFESSE.

2.3. Effets des pratiques de gestion sur la diversité des communautés végétales

Mes travaux sur l'effet des pratiques de gestion sur la diversité des prairies ont commencé en 2015 par le co-encadrement avec Jean-Louis Fiorelli (ASTER) d'une stagiaire de M1 (Laetitia Martini) qui a réalisé un suivi floristique et une évaluation agri-écologique des prairies permanentes du **système expérimental de Mirecourt (Vosges)**. L'objectif était de déterminer si les pratiques de gestion en agriculture biologique favorisaient un maintien voire une augmentation de la diversité végétale des communautés prairiales. Les hypothèses étant que des pratiques plus extensives et diversifiées sont favorables à la diversité végétale car elles limitent la dominance des espèces compétitives. L'étude a été réalisée sur 22 parcelles de prairies permanentes appartenant à un système herbager et à un système de Polyculture Elevage converti en agriculture biologique en 2004. Dix quadrats de 0.25 m² ont été disposés aléatoirement dans chaque parcelle en mai 2015. L'analyse des modes d'utilisation a montré une diversité de pratiques de gestion entre 2008 et 2015 sur ces 22 prairies : fauche exclusive, fauche puis pâturage, pâturage puis fauche puis pâturage, et pâturage exclusif et de la fertilisation soit sous forme d'intrants azotés ou de déjections animales. La diversité de ces prairies a augmenté entre les deux relevés de 2008 et 2015 avec un nombre plus important de prairies à 26-30 espèces différentes en 2015 qu'en 2008 (**Figure 10a**) et un indice de Shannon significativement plus élevé en 2015 (3.29 ± 0.30) qu'en 2008 (2.99 ± 0.50) ($F=2.79$, $p= 0.02$) (**Figure 10b**). **Les pratiques de fauche exclusive et tardive sont le mode de gestion qui favorisent une forte biodiversité taxinomique des prairies.** Ces pratiques sont favorables à l'établissement d'espèces à phénologie plus tardive et permettent d'augmenter le nombre de niches écologiques pour les espèces prairiales. L'effet de la fertilisation azotée sous forme d'effluents d'élevage ou de restitutions au pâturage semble limitée puisque des indicateurs indirects comme l'indice azoté d'Ellenberg ne changent pas entre 2008 et 2015. Une analyse de l'azote minéral et organique des sols aurait permis d'approfondir cette conclusion sur l'effet de la fertilisation. **Le passage en système d'agriculture biologique, par le changement de pratiques de gestion comme la précocité et le nombre de fauches, favorise donc une augmentation et un maintien de la biodiversité végétale sur plusieurs années.**

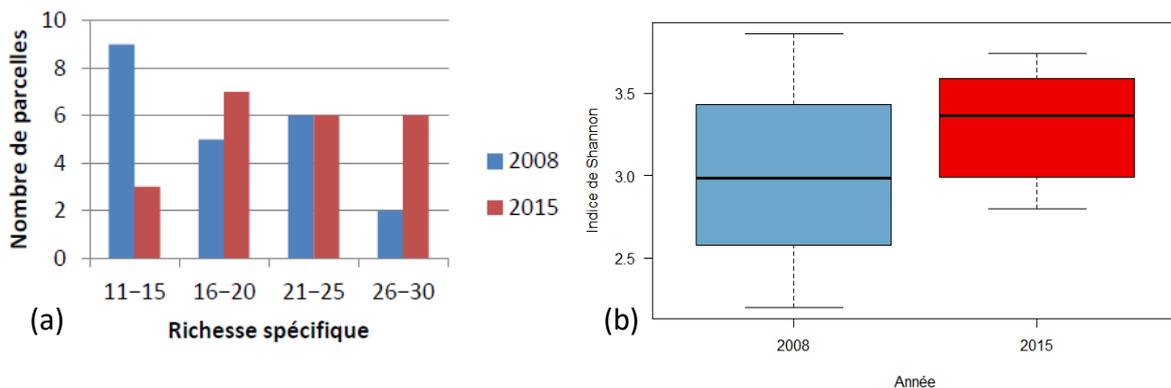


Figure 10. Classes de richesse spécifique (a) et boîtes à moustache (médiane, 1^{er} et 3^{ème} quartiles) des indices de Shannon de 22 prairies permanentes (b) en 2008 et 2015 dans l'Unité Expérimentale INRAE de Mirecourt.

Ensuite, les relations entre pratiques de gestion, pédo-climat et diversité des communautés végétales ont été étudiées à plus large échelle spatiale. La thèse de Geoffrey Mesbahi (LAE), à laquelle j'ai été associée, a été menée sur l'ensemble du massif vosgien de 2017 à 2020 (**Figure 11**). **L'objectif était d'identifier quels facteurs et déterminants influencent le plus la diversité végétale des prairies permanentes.** L'étude de Mesbahi et al. (2020) ([publication 10](#)) recense 353 espèces végétales différentes sur 250 prairies permanentes situées entre 170 et 1424 m d'altitude soit une moyenne (\pm écart-type), de 37.6 (\pm 8.7) espèces par communauté végétale. Ces prairies sont donc plutôt riches en espèces végétales. Elles couvrent des gradients climatiques et de pratiques agricoles assez étendus. Les températures moyennes mensuelles varient de -4 à 12°C et les précipitations moyennes annuelles de 700 à 2300 mm sur la période 1981-2010. 26 % d'entre elles sont en fauche exclusive, 38 % en pâturage exclusif et la fertilisation azotée est de 0 à 277 kg d'azote ha⁻¹ (dont 69 % en organique et 31 % en minéral). Parmi ces 250 prairies, 59 ont été sélectionnées pour les observations *in-situ* pendant la thèse afin qu'elles soient représentatives des différents types de prairies vosgiennes. **Les résultats montrent que les facteurs édaphiques expliquent davantage la présence et l'abondance des espèces végétales** que la composition du paysage, le climat et les pratiques agricoles. Plus précisément, les facteurs édaphiques expliquent 19.8 % de la variation des présences sur les 25.6 % expliqué par l'ensemble des facteurs et 22.5 % de la variation des abondances sur les 31.0 % expliqué par l'ensemble des facteurs (**Figure 12**). Ces résultats montrent l'importance de la variabilité des facteurs édaphiques pour les pools d'espèces de la communauté et en particulier les cations échangeables (Al, K₂O, ...), le pH, le C/N et la quantité de matière organique des sols. **La variabilité des conditions environnementales de cette étude est probablement l'une des explications du faible effet observé des pratiques agricoles sur la diversité taxinomique des communautés végétales.** Une partie importante de la variance de la diversité végétale n'est pas expliquée par les facteurs et déterminants étudiés. **Ces observations illustrent l'importance de prendre en compte les filtres biotiques (interactions) en plus des filtres environnementaux** pour comprendre l'assemblage des communautés végétales prairiales.

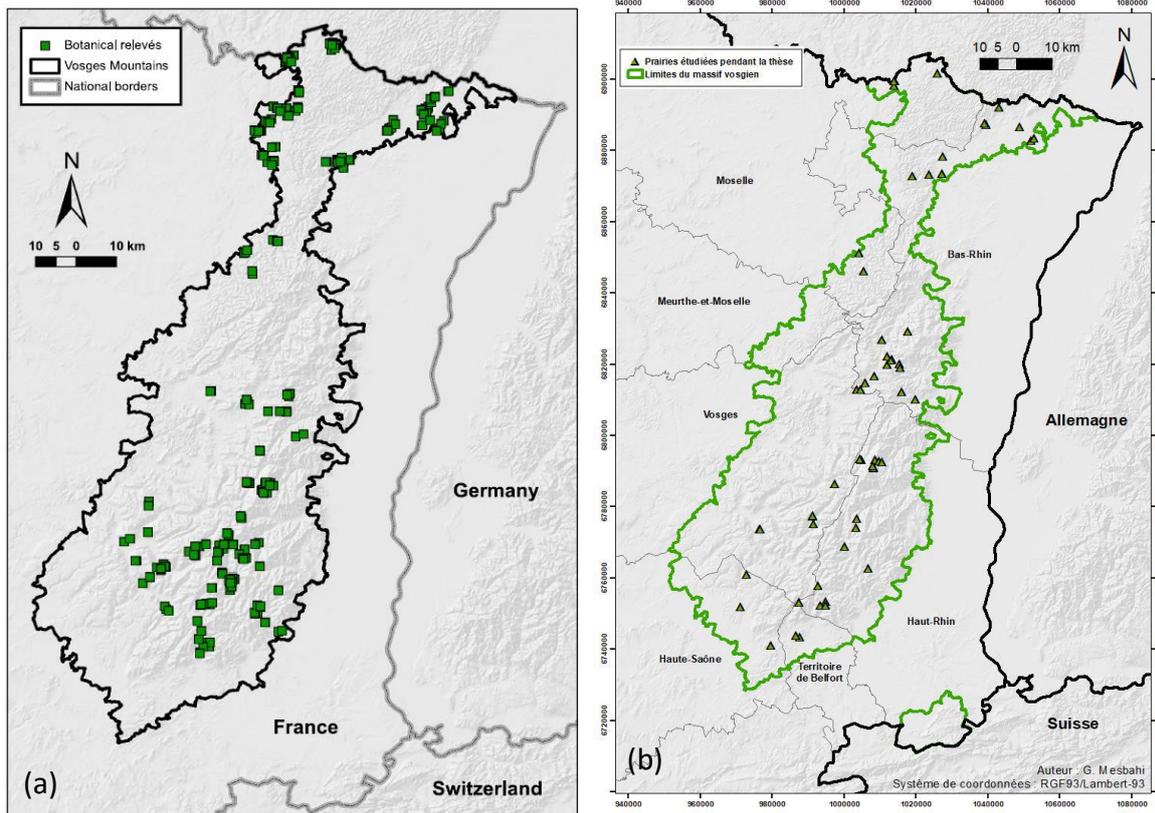


Figure 11. Localisation (a) des 250 relevés botaniques réalisés dans les montagnes vosgiennes de 2001 à 2013 qui ont été utilisés dans la thèse de Geoffrey Mesbahi (b) des 59 prairies étudiées dans l'ensemble du massif vosgien. Source : Mesbahi et al. (2020).

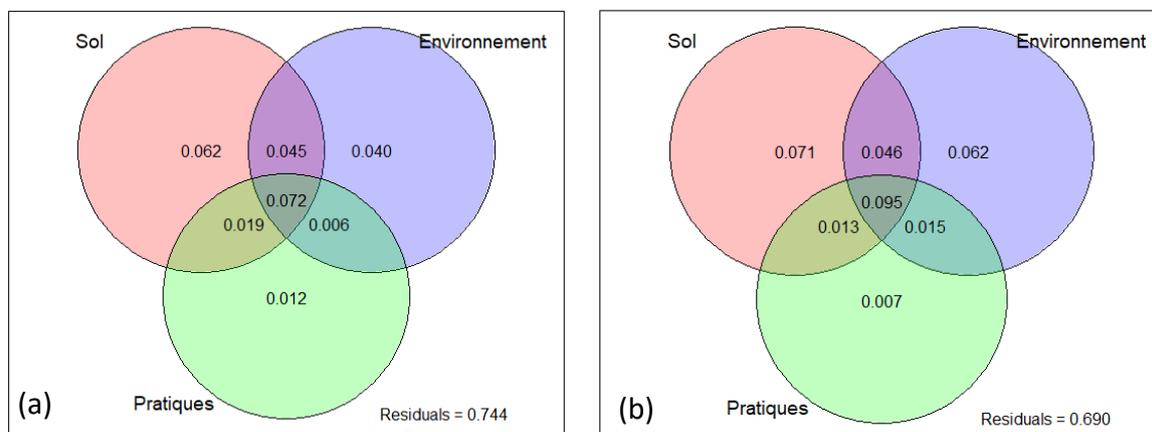


Figure 12. Parts de la présence (a) et de l'abondance (b) des espèces végétales expliquées par le sol, l'environnement (paysage et climat) et les pratiques agricoles. Source : Mesbahi et al. (2020).

2.4. Relations entre diversité végétale et biens ou services écosystémiques

Face à la nécessité de réduction des intrants, **la diversité végétale des prairies pourrait fournir des molécules aux propriétés intéressantes pour la santé animale.** Les méthodes de quantification de ces molécules et les propriétés associées sont cependant assez peu étudiées et le lien avec la santé animale encore peu établi scientifiquement. En 2017, nous avons réalisé

une revue conséquente sur le sujet (**Poutaraud et al., 225 références, publication 11**). L'objectif était de répertorier l'ensemble des molécules contenues dans les espèces prairiales et de recenser les propriétés démontrées pour la santé animale (schéma en **Figure 13**). Nous avons utilisé la **base de données eFLORAsys** (<http://eflorasys.univ-lorraine.fr>) pour indiquer la fréquence des espèces prairiales présentes dans la revue. eFLORAsys a été créé en 1992 puis développée par Sylvain Plantureux et Bernard Amiaud. Cette base de données agroécologiques contient 8402 relevés de végétation sur prairies (au 30 décembre 2021) et 22280 genres/espèces/sous-espèces différentes, issues de la base TAXREF du MNHN, et complétée par le LAE pour la partie agronomique. Je reviendrai sur les développements futurs d'eFLORAsys dans la partie V concernant mon projet de recherche. Les résultats montrent que **les composés qui seraient potentiellement favorables à la santé animale sont principalement des antioxydants** (composés phénoliques, terpénoïdes, caroténoïdes). Ces antioxydants sont contenus dans des plantes prairiales très fréquentes comme *Achillea millefolium*, *Lolium perenne*, *Trifolium repens* et *Trifolium pratense*, présentes aussi bien sur des prairies extensives que plus intensives ; mais également dans des espèces plus typiques de certains habitats ou de prairies extensives comme *Thymus vulgaris* ou *Knautia arvensis*. Cependant, la revue démontre également que **les fourrages peuvent contenir des composés toxiques principalement phytoestrogènes, photosensibilisants voire létaux selon les doses**. Les espèces qui en contiennent peuvent être très fréquentes comme *Trifolium pratense*, *Plantago lanceolata* ou *Ranunculus acris* ou moins fréquentes comme *Colchicum autumnal* ou *Jacobaea vulgaris*. La difficulté est donc d'analyser un ensemble d'espèces présentes dans les fourrages et de faire le lien avec la santé animale de façon analytique.

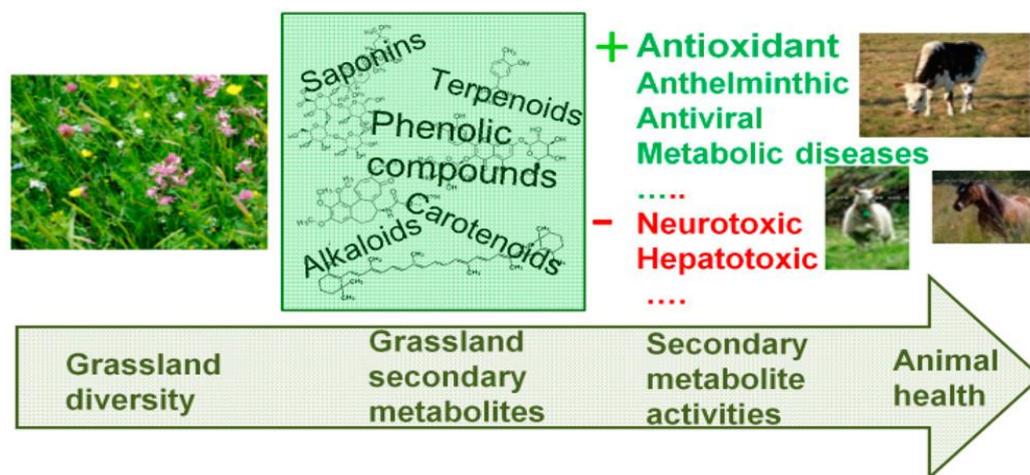


Figure 13. Figure résumée de la revue de Poutaraud et al. (2017).

Les travaux issus de la **thèse de Geoffrey Mesbahi** (2017-2020) ont également contribué à la question des relations entre diversité des communautés prairiales et services écosystémiques. Plus précisément, ici le terme de « propriété agroécologique » est utilisé pour regrouper à la fois les services écosystémiques mais également les biens et les déterminants biophysiques des prairies. **L'objectif est d'utiliser différentes typologies pour prédire au mieux un ensemble de propriétés agroécologiques** (**publication 12**). Les typologies sont des classifications qui regroupent des individus (ici des communautés prairiales) aux caractéristiques semblables au sein de types. Elles permettent « d'organiser et de synthétiser les connaissances sur des objets d'étude souvent complexes et variés, en vue de les analyser

et de les décrire simplement » (Michaud et al. 2013). Trois typologies différentes ont été utilisées pour classer les prairies du massif vosgien : phytosociologique, agronomique et fonctionnelle. La typologie agronomique seule permet de bien prédire le type de gestion (fauche, pâture ou mixte), le rendement et l'altitude des communautés prairiales (**Figure 14**). Pour bien prédire les autres propriétés, il est nécessaire de croiser plusieurs typologies : les typologies agronomique et phytosociologique pour bien prédire la richesse en familles végétales et la biomasse relative des graminéoïdes, dicotylédones (hors Fabacées) et Fabacées ; les typologies agronomiques et fonctionnelles pour bien prédire l'indice d'Ellenberg d'humidité ; les typologies phytosociologique et fonctionnelle pour prédire la richesse en plantes oligotrophes et la valeur pastorale ; et les trois typologies pour bien prédire l'indice de fertilité d'Ellenberg et la biomasse relative des types de fourrage selon trois classes de phénologie (précoce, normal et tardif). Les propriétés écologiques (richesse spécifique, nombre de familles botaniques, indices de Shannon et Simpson, abondance des formes de vie, valeur pour les pollinisateurs, indice de profondeur du système racinaire d'Ellenberg, richesse en espèces oligotrophes) sont les moins bien prédites par les typologies. **En conclusion, les typologies agronomiques semblent mieux prédire les propriétés agroécologiques prairiales que les typologies phytosociologiques et fonctionnelles.** La typologie fonctionnelle utilisée était limitée aux seules Poacées. Cette famille est majoritaire dans les prairies permanentes étudiées mais une typologie incluant également les espèces dicotylédones pourrait potentiellement améliorer les prédictions obtenues. **Pour mieux prédire les propriétés écologiques prairiales, les typologies phytosociologiques seules ne suffisent pas et il semble nécessaire d'associer plusieurs typologies.** Cette étude a d'ailleurs permis la constitution d'une nouvelle typologie des prairies vosgiennes croisant des approches phytosociologiques, agronomiques et écologiques (Bayeur et al., 2020).

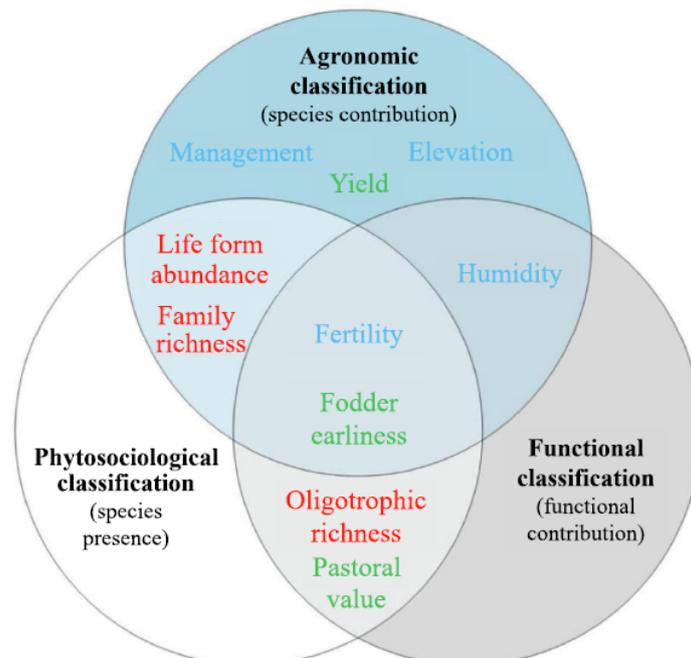


Figure 14. Représentation des meilleures typologies pour prédire 10 caractéristiques des prairies (ajustement des données prédites > 0.5). Les caractéristiques écologiques sont indiquées en rouge, les caractéristiques agronomiques en vert et les caractéristiques environnementales en bleu. Source : Mesbahi et al. (2020).

En 2019, j'ai rejoint avec mon collègue Sylvain Plantureux **le projet SURPAS** (Etat de conservation des systèmes agropastoraux) en tant que partenaire et coordinatrice du site lorrain. Ce projet national, coordonné par Anne Bonis (GEOLAB) a pour objectif **d'étudier la dynamique de l'état de conservation des prairies permanentes selon les facteurs environnementaux et les services écosystémiques associés**. Ce réseau comprend neuf sites d'étude répartis en France (**Figure 15**), pour partie en zone Natura 2000, avec cinq à dix associations végétales d'intérêt communautaires différentes étudiées par site, rattachées à 17 habitats génériques différents (**Tableau 3**. Liste des habitats génériques agro-pastoraux suivis expérimentalement dans le projet Surpas selon les sites.). Les gradients de gestion identifiés sur les sites sont principalement : l'intensité du pâturage, le nombre et la date des fauches, le type de pâturage et le niveau de fertilisation. De nombreuses données ont été acquises sur ces sites d'avril à septembre 2019 (analyses de sol, pratiques agricoles, relevés floristiques, production et qualité fourragères) et complétées en 2020.

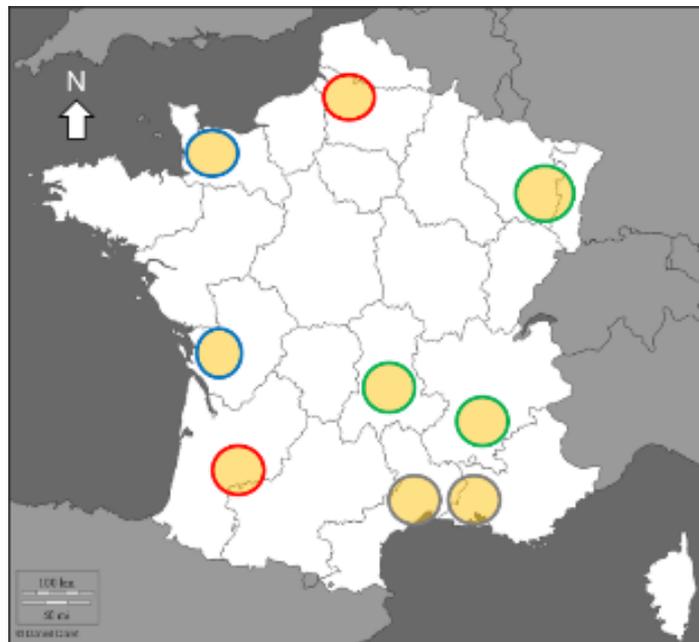


Figure 15. Localisation des 9 sites du projet Surpas. En rouge : Coteaux de Picardie, Coteaux de Gascogne ; en bleu : Marais du Cotentin, Marais poitevin ; en gris : Camargue, Crau ; en vert : Vercors, Chaîne des puy et Lorraine-Vosges.

Tableau 3. Liste des habitats génériques agro-pastoraux suivis expérimentalement dans le projet Surpas selon les sites.

Code	Nom	Coteaux de Picardie	Marais du Cotentin	Marais Poitevin	Vercors	Chaîne des Puy	Camargue	Crau	Lorraine-Vosges	Coteaux de Gascogne
1320	Prés à <i>Spartina</i> (<i>Spartinion maritimae</i>)			x						
1330	Prés-salés atlantiques (<i>Glauco-Puccinellietalia maritimae</i>)		x	x						
1410	Prés-salés méditerranéens (<i>Juncetalia maritimi</i>)		x	x			x			
1510	Steppes salées méditerranéennes (<i>Limonietalia</i>)						x			
2130	Dunes côtières fixées à végétation herbacée ("dunes grises")									x
4030	Landes sèches européennes				x	x			x	
4060	Landes alpines et boréales				x					
5130	Formations à <i>Juniperus communis</i> sur landes ou pelouses calcaires									X
6110	Pelouses rupicoles calcaires ou basiphiles de l' <i>Alyso-Sedion albi</i>				x					
6170	Pelouses calcaires alpines et subalpines				x					
6210	Pelouses sèches semi-naturelles et faciès d'embuissonnement sur calcaires (<i>Festuco-Brometalia</i>) (* sites d'orchidées remarquables)	x		x	x	x				X
6220	Parcours substeppiques de graminées et annuelles des Thero-Brachypodietea						x	x		
6230	Formations herbeuses à <i>Nardus</i> , riches en espèces, sur substrats siliceux des zones montagnardes (et des zones submontagnardes de l'Europe continentale)				x				x	
6410	Prairies à <i>Molinia</i> sur sols calcaires, tourbeux ou argilo-limoneux (<i>Molinion caeruleae</i>)	x	x						x	
6420	Prairies humides méditerranéennes à grandes herbes du <i>Molinio-Holoschoenion</i>						x	x		
6510	Prairies maigres de fauche de basse altitude (<i>Alopecurus pratensis</i> , <i>Sanguisorba officinalis</i>)	x		x	x		x	x	x	
6520	Prairies de fauche de montagne				x	x			x	

Actuellement, le projet est en cours de valorisation ([publication 13](#)). Les résultats les plus approfondis portent sur les relations entre la diversité des communautés prairiales et la production et qualité fourragères. Ces relations ont été analysées sur un total de 203 parcelles de 16 m² (**Tableau 4**) à l'échelle nationale. L'échantillonnage constitué de 76 unités de végétation est représentatif de la variabilité de plus d'un quart des végétations agropastorales nationales ce qui confère aux résultats un bon niveau de généralité. Les fourrages ont été récoltés avec une somme de degrés jour proche de 550 depuis le 1^{er} février excepté pour le Cotentin où les parcelles étaient inondées et ont été récoltées entre 1000 et 1140 degrés jour. Des modèles mixtes ont été réalisés pour tester l'effet fixe de chaque variable de biodiversité des communautés prairiales sur la teneur moyenne en minéraux, la teneur en protéines brutes, la digestibilité de la matière sèche et la quantité de biomasse sèche des fourrages. La variable « site » a été ajoutée en variable aléatoire. Les résultats montrent que **l'augmentation du pourcentage de dicotylédones et de la diversité taxinomique des communautés ont tendance à significativement diminuer la production de biomasse fourragère (Figure 16 et Figure 17). A l'inverse, l'augmentation du pourcentage de légumineuses et de dicotylédones ainsi que l'augmentation de l'indice d'équitabilité ont tendance à significativement augmenter la teneur moyenne en minéraux, la teneur en protéines brutes et la digestibilité de la matière sèche des fourrages.** L'augmentation de la richesse spécifique et la diminution de l'indice de Shannon diminuent la teneur moyenne en minéraux des fourrages. L'augmentation de la CWM de la SLA et la diminution de la CWM de la LDMC augmentent significativement les trois variables de qualité fourragère. Ces premiers résultats montrent dans l'ensemble les compromis entre biodiversité végétale et biens écosystémiques. En effet, **les prairies les plus diversifiées ont généralement une baisse de la production fourragère mais une augmentation de la qualité fourragère qui peut être bénéfique à la santé animale.** Ils mettent en évidence la nécessité de trouver les bons équilibres agri-écologiques dans la gestion des prairies et d'approfondir l'évaluation de la qualité fourragère pour conserver la biodiversité des prairies et améliorer la santé animale.

Tableau 4. Description des placettes d'étude pour l'analyse des relations entre la diversité des communautés végétales et la production et qualité fourragères dans le projet SURPAS. Les types d'habitats correspondent au niveau 2 de la classification EUNIS. Source : Blaix et al. (2022).

Site	EUNIS habitat type	Geographic feature	Biogeographic region	Number of plots
AQU	(R1) Dry grassland	Hill	Atlantic	11
COT	(R3) Seasonally wet and wet grasslands	Marsh	Atlantic	24
CRA	(R1) Dry grassland	Plain	Mediterranean	30
LOR	(R2) Mesic grasslands, (R3) Seasonally wet and wet grasslands	Plain	Continental	15
POI	(MA2) Littoral biogenic habitat, (R3) Seasonally wet and wet grasslands	Marsh	Atlantic	37
PUY	(R1) Dry grassland, (R2) Mesic grasslands, (S4) Temperate shrub heathland	Mountain	Continental	37
SOM	(R1) Dry grassland,	Hill	Atlantic	27
VER	(R1) Dry grassland, (R2) Mesic grasslands, (S4) Temperate shrub heathland	Mountain	Alpine	21

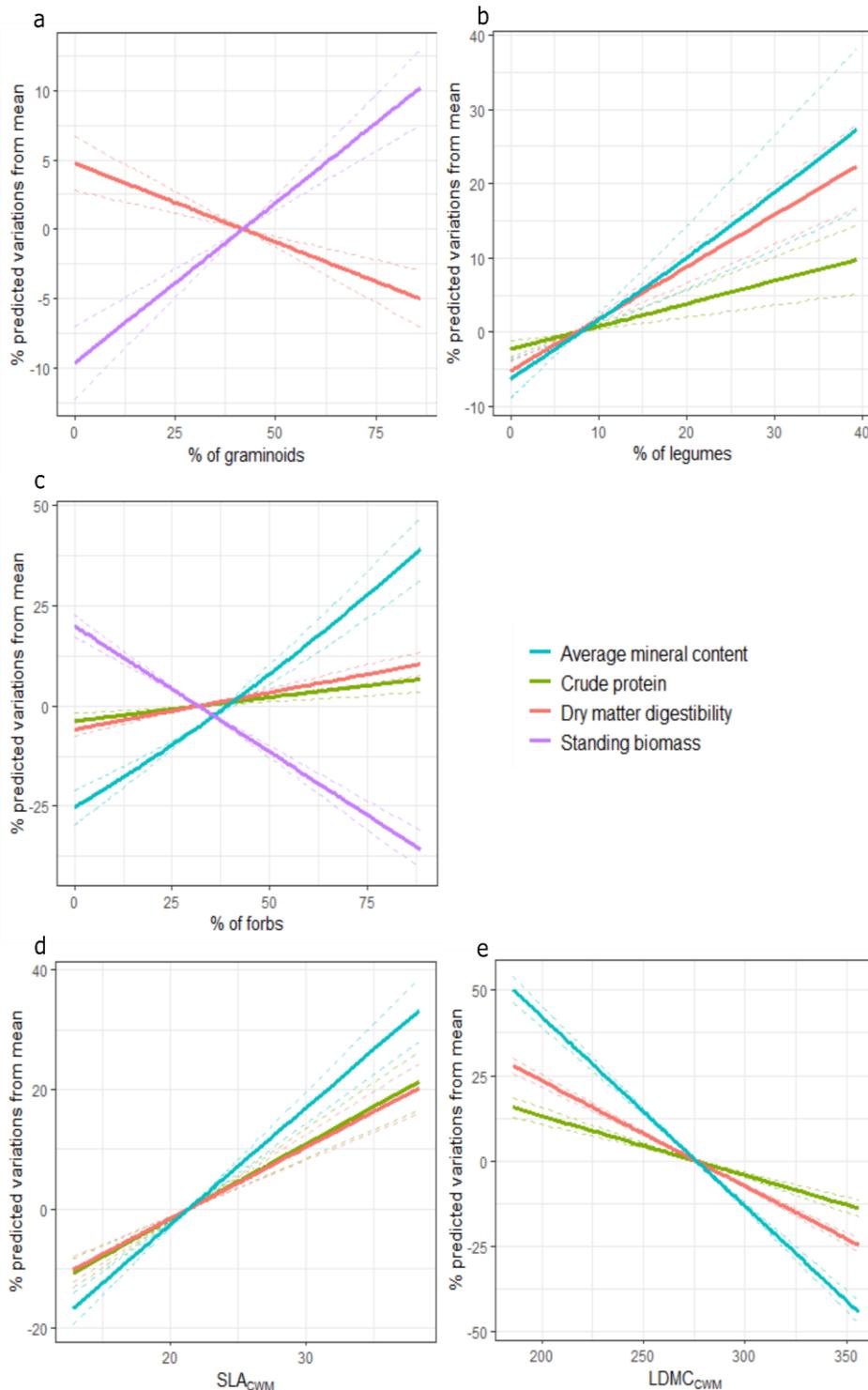


Figure 16. Effets des types fonctionnels de plantes (a : pourcentage de Graminoïdes, b : pourcentage de légumineuses et c : pourcentage de dicotylédones), de la CWM de la surface foliaire spécifique (SLA) (d) et de la CWM de la teneur en matière sèche des feuilles (LDMC) (e) sur la teneur moyenne en minéraux, la teneur en protéines brutes, la digestibilité de la matière sèche et la quantité de biomasse sèche des fourrages. Les variables de réponse sont représentées comme un pourcentage de déviation des valeurs prédites par rapport à la moyenne des valeurs. Seules les relations significatives ($p < 0.05$) sont représentées. Source : Blaix et al. (2022).

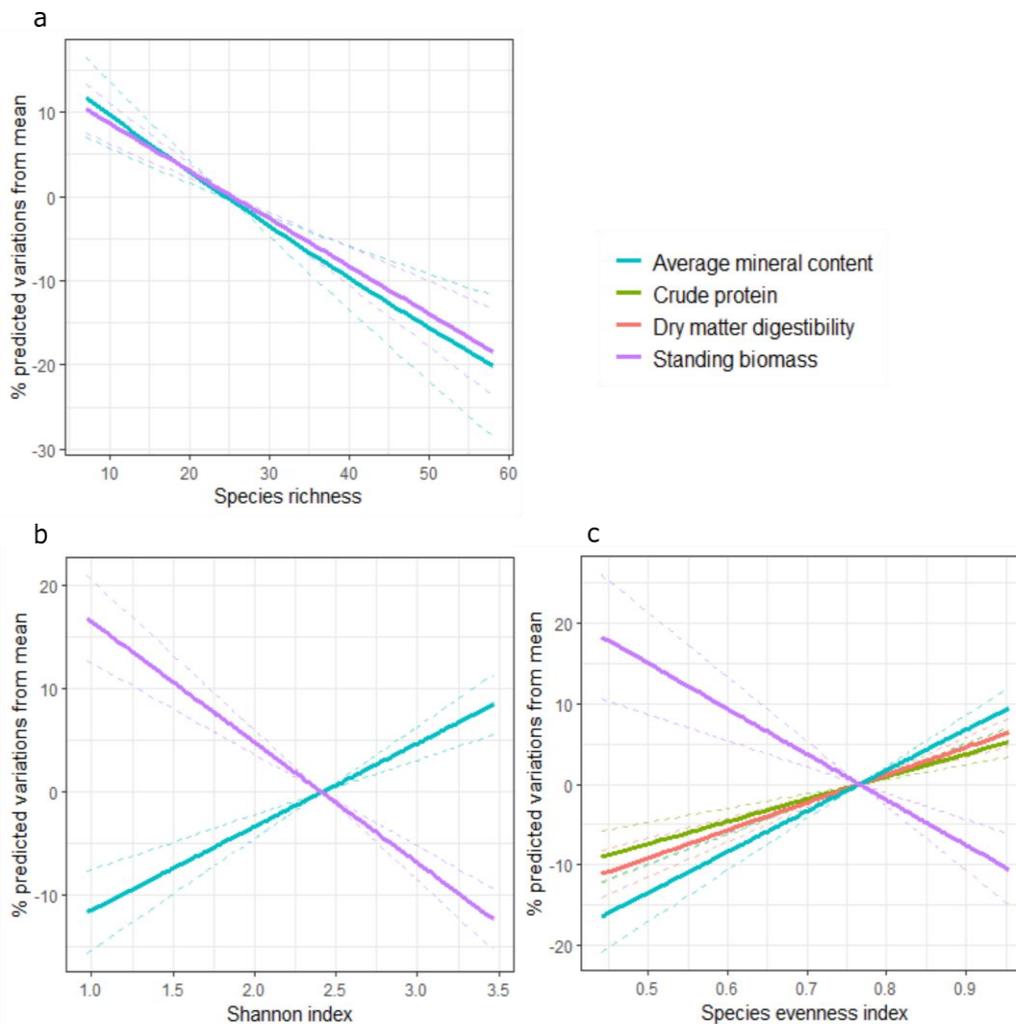


Figure 17. Effets de la richesse spécifique des plantes (a), de l'indice de Shannon (b) et de l'indice d'équitabilité de Piéluo (c) sur la teneur moyenne en minéraux, la teneur en protéines brutes, la digestibilité de la matière sèche et la quantité de biomasse sèche des fourrages. Les variables de réponse sont représentées comme un pourcentage de déviation des valeurs prédites par rapport à la moyenne des valeurs. Seules les relations significatives ($p < 0.05$) sont représentées. Source : Blaix et al. (2022).

En 2018 et 2019, j'ai participé au **projet PESI** (Évaluation et validation d'indicateurs de services écosystémiques rendus par les prairies) coordonné par Simon Taugourdeau (SELMET). Ce projet a pour objectif de développer un ensemble d'indicateurs de services écosystémiques des prairies pâturées à partir de relevés botaniques. **L'hypothèse forte de ce projet est que les services écosystémiques pourraient être prédictibles à partir de la connaissance de la composition botanique des prairies.** Pour cela, une méthodologie à dire d'expert a été développée. L'outil TATALE (Taugourdeau & Messad, 2017) a été utilisé pour calculer les indicateurs. Deux-mille-trente relevés botaniques situés en France ont été utilisés et sont issues de trois bases de données : eflorasys (1971 relevés), Aeole (51 relevés) et Soere (8

relevés). Six bien ou services écosystémiques ont été étudiés : la production fourragère, la souplesse d'exploitation (i.e. la possibilité de faire varier les dates de récolte du fourrage sans en impacter la qualité), la conservation de la biodiversité végétale, la résilience aux événements extrêmes, la quantité d'azote disponible pour les plantes et la pollinisation. Des experts pour ces différents services ont été réunis et différentes étapes se sont succédées (**Figure 18**) :

1. identification du service étudié ;
2. sélection des critères de végétation qui ont un effet sur le service ;
3. choix de la forme de transformation des critères de végétation calculés à partir des relevés botaniques pour les normaliser entre 0 et 1 ;
4. choix de la méthode pour agréger les différents scores des critères de végétation.

J'ai animé les réunions pour le service de pollinisation. Le projet est en cours de valorisation ([publication 14](#)) et je vais présenter les premiers résultats ci-dessous.

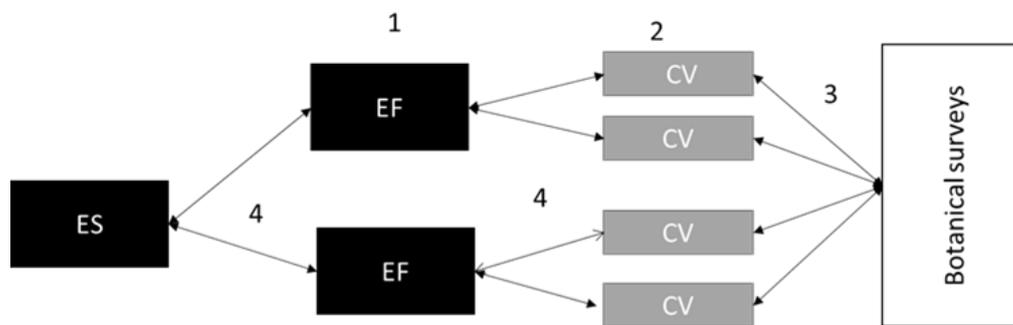


Figure 18. Représentation schématique des étapes de constitution des arbres pour chaque service. Source : Taugourdeau et al. (submitted).

Le service de conservation de la diversité des plantes est influencé par deux grands critères de végétation : la richesse spécifique locale et l'originalité des espèces régionales (**Figure 19**). Ces critères sont construits à partir de différentes variables à droite dans l'arbre.

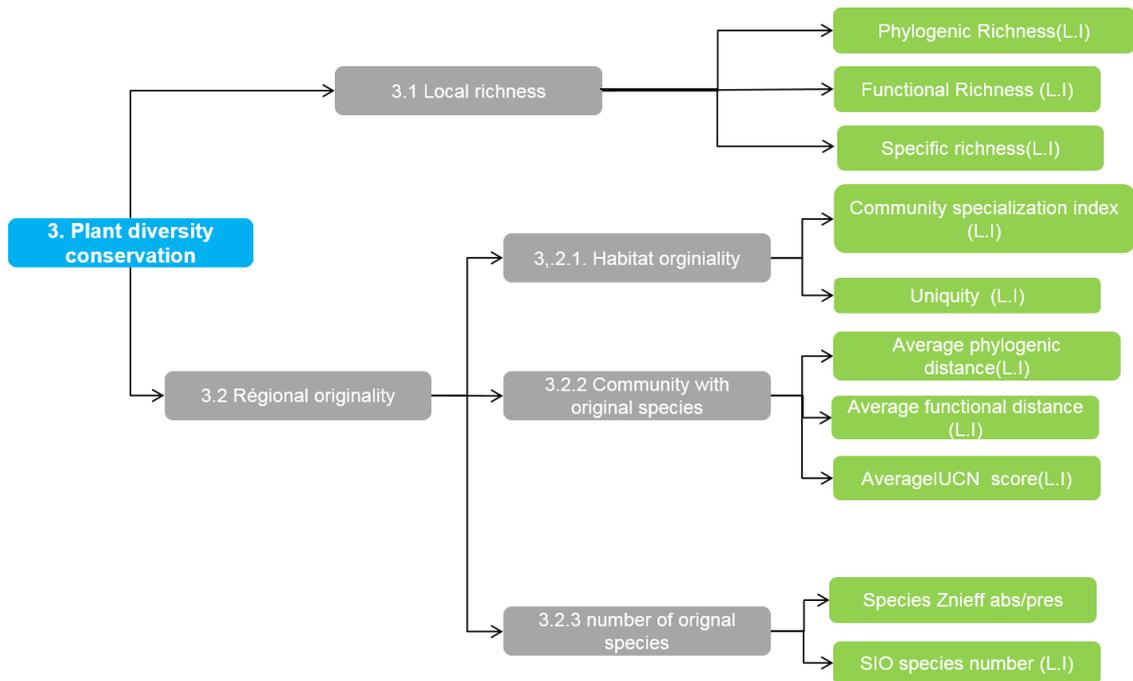


Figure 19. Exemple d’arbre présentant les critères de végétation nécessaires à la prédiction du service de conservation de la diversité des plantes. Les variables suivent des fonctions de transformation en score linéaires (L.I) excepté le critère « espèces Znieff » transformé en un score binaire : présence (1) ou absence (0). Source : Taugourdeau et al. (submitted).

Les premiers résultats sont issus d’une analyse en composantes principales regroupant le service de conservation de la diversité végétale (CDV) et l’ensemble des scores de critères de végétation utilisés pour l’estimer (**Figure 20a**). **Le score de conservation de la diversité végétale (CDV) semble plus proche du critère d’originalité régionale (OR) que de la richesse spécifique locale (RL).** La richesse spécifique locale est proche du score d’originalité de l’habitat et du nombre d’espèces originales. L’analyse en composantes principales réalisée avec les scores de cinq services écosystémiques montre que **la production fourragère (AF) et la quantité d’azote disponible pour les plantes sont proches (Figure 20b) et que la résilience de la communauté végétale aux événements extrêmes est reliée négativement à ces deux services. La conservation de la biodiversité végétale et la souplesse d’exploitation sont proches** entre elles mais indépendantes des autres services.

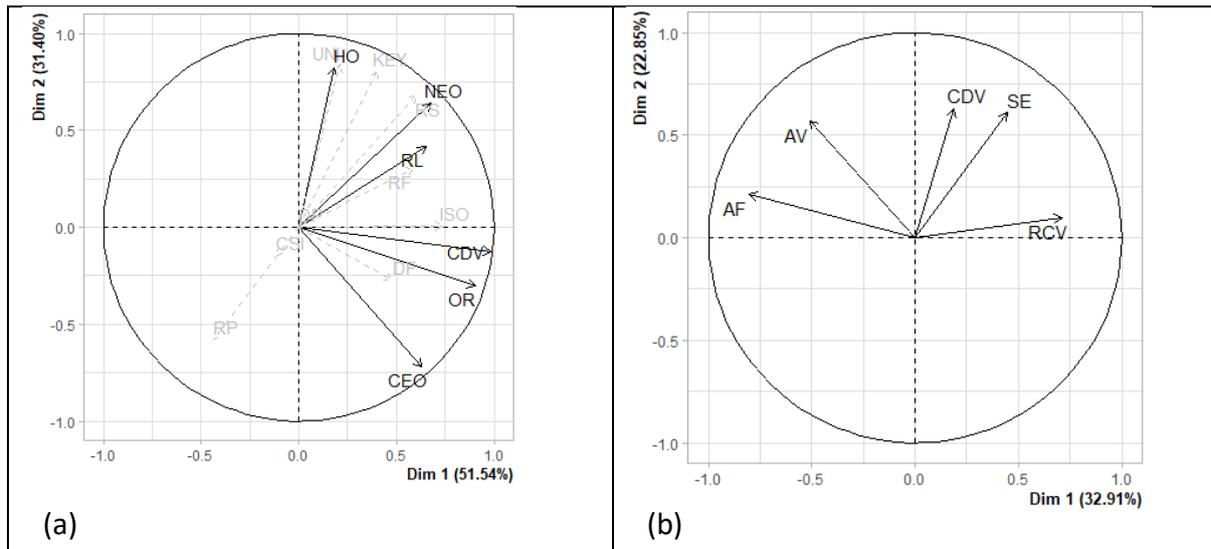


Figure 20. Analyse en composantes principales des différents critères de végétation pour la conservation de la biodiversité végétale (a) et de cinq services écosystémiques (b). Source : Taugourdeau et al. (submitted).

Sur des relevés principalement réalisés au Nord-Est de la France (1038 relevés issus d'Eflorasys) une analyse de l'évolution temporelle des services a pu être menée. Parmi les cinq services étudiés, deux d'entre eux montrent une tendance temporelle significative. La conservation de la biodiversité végétale diminue entre 1970 et 2000 (**Figure 21a**). La disponibilité en azote de la végétation est plus faible entre 1970 et 1990 qu'entre 1990 et 2010 (**Figure 21b**).

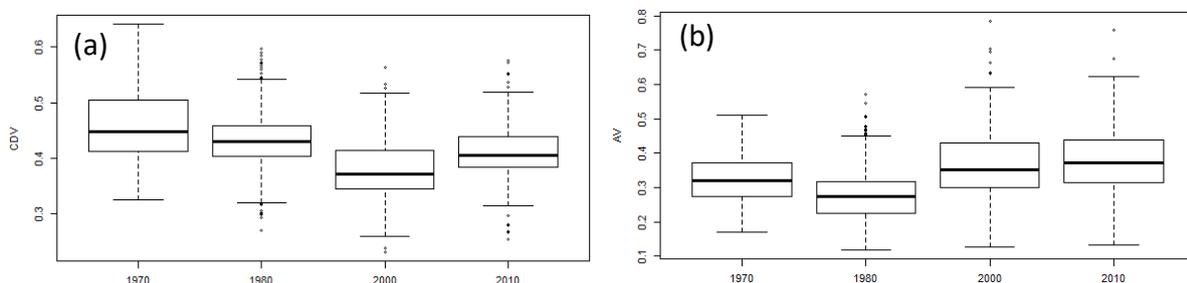


Figure 21. Evolution temporelle du service de conservation de la biodiversité des plantes (a) et du service de disponibilité de l'azote pour les plantes (b) entre 1970 et 2010 sur 1038 relevés issus d'Eflorasys. Source : Taugourdeau et al. (submitted).

Cette analyse montre les synergies et antagonismes entre biens ou services écosystémiques. Ainsi, les prairies à forte production fourragère et disponibilité en azote ne semblent pas être les plus résilientes aux événements extrêmes. **Elle permet également de mettre en évidence une dynamique temporelle des services sur le long terme (ici 40 ans).** Cette approche par indicateurs est ainsi complémentaire aux approches expérimentales car elle permet l'analyse de plusieurs services à partir d'un jeu de données conséquent sur de nombreuses années.

Les pratiques de gestion extensives comme la diminution du nombre de fauches, la fauche tardive et le passage en système d'agriculture biologique peuvent favoriser et maintenir la richesse spécifique des communautés prairiales dans les exploitations agricoles. Cependant, à des échelles spatiales plus larges, ici régionales, les facteurs édaphiques peuvent davantage expliquer la présence et l'abondance des espèces végétales en prairie permanente que les pratiques de gestion, le climat ou la composition paysagère. Selon les gradients environnementaux et les échelles spatiales, les facteurs qui influencent majoritairement la diversité taxinomique végétale des prairies permanentes ne sont pas identiques et il reste complexe de prédire une grande part de la variation de cette diversité. Une solution pour prédire au mieux les propriétés agroécologiques de ces communautés complexes pourrait être d'associer plusieurs typologies (agronomique, fonctionnelle et phytosociologique). Un des biens produits par les prairies permanentes diversifiées qui pourrait conduire à les conserver est la présence d'antioxydants qui peuvent améliorer la santé animale et la qualité fourragère bien que certaines espèces contiennent des composés toxiques. De plus, ces prairies sont généralement moins productives mais pourraient être plus résilientes aux événements extrêmes.

Ces travaux m'ont permis d'acquérir un ensemble de connaissances sur les déterminants de la diversité des communautés végétales prairiales et les biens et services associés. **Ces études ont mis en évidence des synergies et antagonismes entre services et la nécessité de combiner des approches taxinomiques et fonctionnelles pour caractériser la diversité végétale et ses relations avec les services. Imbriquer des études à l'échelle locale et régionale, et des approches expérimentales et statistiques utilisant des indicateurs, permet de combiner une compréhension mécaniste et une certaine généralité des résultats.** Ces approches intégratives seront nécessaires pour mettre en place dans mon projet des aménagements fonctionnels dans les agrosystèmes de la parcelle au territoire pour la conservation de la biodiversité.

A l'issue de ces travaux, j'ai souhaité aller plus loin en construisant plus finement ma propre thématique de recherche. **Il me semblait nécessaire d'apporter une approche nouvelle sur les prairies complétant nos travaux déjà réalisés sur les services.** J'ai ainsi étudié les interactions fonctionnelles entre plantes et pollinisateurs en milieu prairial. Pour cela j'ai croisé mes connaissances en écophysiologie, en écologie fonctionnelle des communautés et j'ai développé des connaissances en écologie de la pollinisation.

Publications

10. Mesbahi, G., **Michelot-Antalik, A.**, Goulnik, J., Plantureux, S. (2020). Permanent grassland classifications predict agronomic and environmental characteristics well, but not ecological characteristics. *Ecological Indicators*, 110 (4 citations)
11. Poutaraud, A., **Michelot-Antalik, A.**, Plantureux, S. (2017). Grasslands: A Source of Secondary Metabolites for Livestock Health. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65 (31) (31 citations)
12. Mesbahi, G., Bayeur, C., **Michelot-Antalik, A.**, Plantureux, S. (2019). Quelles typologies pour la prédiction des propriétés des prairies permanentes ? *Fourrages*, 237
13. Blaix, C., Chabrierie, O., Alard, D., Catterou, M., Diquelou, S., Dutoit, T., Lacoux, J., Lemauviel-Lavenant, S., Loucougaray, G., **Michelot-Antalik, A.**, Pacé, M., Tardif, A., & Bonis, A. (2022). Forage Nutritive Value Shows Synergies with Plant Diversity in a Wide Range of Semi-Natural Grassland Habitats (SSRN Scholarly Paper No. 4180434).
14. Taugourdeau, S., Messad, S., Louault, F., **Michelot-Antalik, A.**, Vigneron, M., Puisse, L., Yentur, L., Millet, C.P. Bastianelli, D., Carrere, P., Plantureux, S. (2020). Pasture Ecosystem Services Indicators: an expert based set of indicators of ecosystem services. 28th General Meeting of the European Grassland Federation. Helsinki, Finland, 19-21 october 2020

3. Etude fonctionnelle des interactions plantes-pollinisateurs

3.1 Contexte

Pour prédire au mieux les niveaux de services rendus par les prairies et proposer des leviers de gestion de ces écosystèmes aux agriculteurs, l'analyse des interactions entre les différents taxons végétaux et animaux à l'origine des services écosystémiques est essentielle. Ces interactions entre et à l'intérieur des niveaux trophiques sont en effet complexes et doivent être davantage étudiées selon des approches dites « fonctionnelles ». **Selon le modèle conceptuel proposé par Lavorel et al. (2013) (Figure 22), l'impact des changements environnementaux sur le fonctionnement des prairies peut être étudié en utilisant les traits fonctionnels** mesurés sur plusieurs niveaux trophiques. Ainsi, il est défini des traits de réponse dont les valeurs vont être influencées par des facteurs environnementaux et des traits d'effet qui vont eux influencer les propriétés et le fonctionnement des écosystèmes. Les traits reflétant des relations entre niveaux trophiques sont eux appelés « traits d'interaction » (Le Provost et al., 2017).

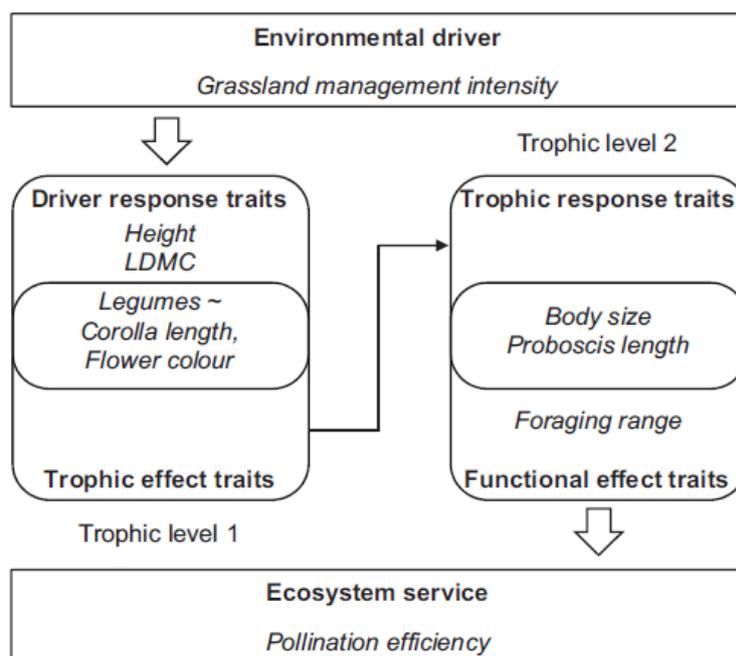


Figure 22. Méthode pour établir les relations entre traits de réponse et traits d'effet à l'intérieur et entre deux niveaux trophiques pour prédire les changements dans le fonctionnement des écosystèmes. Source : Lavorel et al. (2013).

Parmi les services de régulation fournis par les prairies permanentes, **je me suis plus particulièrement intéressée ces dernières années au service de pollinisation.** Après une recherche bibliographique et une participation à un premier projet sur les interactions plantes-pollinisateurs en 2016, **il m'a semblé percevoir des questions originales à traiter sur les liens entre pollinisateurs et fleurs à l'échelle des communautés avec une approche fonctionnelle.** En effet, les traits floraux ont été peu étudiés dans l'approche de l'écologie fonctionnelle par mesures de traits et l'écologie des communautés est peu utilisée en écologie de la pollinisation (E-Vojtkó et al., 2020).

Environ 78 % des espèces de plantes à fleur ou Angiospermes auraient recours aux insectes pollinisateurs pour assurer leur reproduction sexuée en milieu tempéré (Ollerton et al., 2011). Les principaux pollinisateurs sont des Hyménoptères (abeilles, bourdons) mais aussi des Diptères, Lépidoptères (papillons) et Coléoptères. Cependant, le déclin de l'abondance et de la diversité des pollinisateurs a été observé pour différents taxons dans de nombreuses études et est dû à l'exposition aux pesticides, à l'introduction des espèces invasives, au changement climatique et à la perte et fragmentation des habitats (Potts et al., 2010). Par exemple, la biomasse des insectes volants a diminué de 77 % dans des aires protégées en Allemagne entre 1989 et 2016 (Hallmann et al., 2017). Les prairies permanentes fournissent des habitats et des ressources florales pour les pollinisateurs dans les paysages agricoles. Par exemple, les travaux de Steffan-Dewenter and Tscharrntke (1999) et plus récemment de Klaus et al. (2021) montrent que les prairies calcicoles sont des habitats majeurs pour les abeilles sauvages et favorisent la pollinisation des paysages adjacents.

Les interactions plantes-pollinisateurs peuvent se caractériser par des relations entre les traits floraux et les insectes qui visitent les fleurs. Ces traits floraux sont considérés comme des traits

d'interaction et peuvent être des traits de phénologie, des signaux (morphologie, couleur, odeurs émises par les fleurs sous forme de composés organiques volatiles ou COV), des barrières à l'exploitation des fleurs (ou traits d'accessibilité) ou des récompenses sous forme de pollen (protéines) ou nectar (sucres). Les relations entre traits floraux et perception des insectes sont schématisées dans la **Figure 23**. Je présenterai mes travaux sur les interactions plantes-pollinisateurs et le service de pollinisation selon le schéma en **Figure 24**, toujours en suivant le continuum facteurs – déterminants – services.

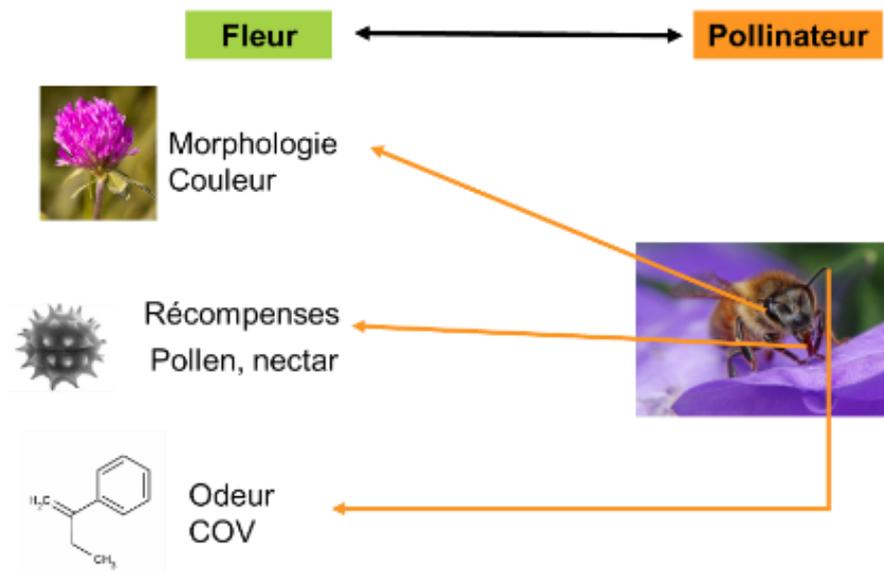


Figure 23. Relations entre traits floraux et insectes pollinisateurs

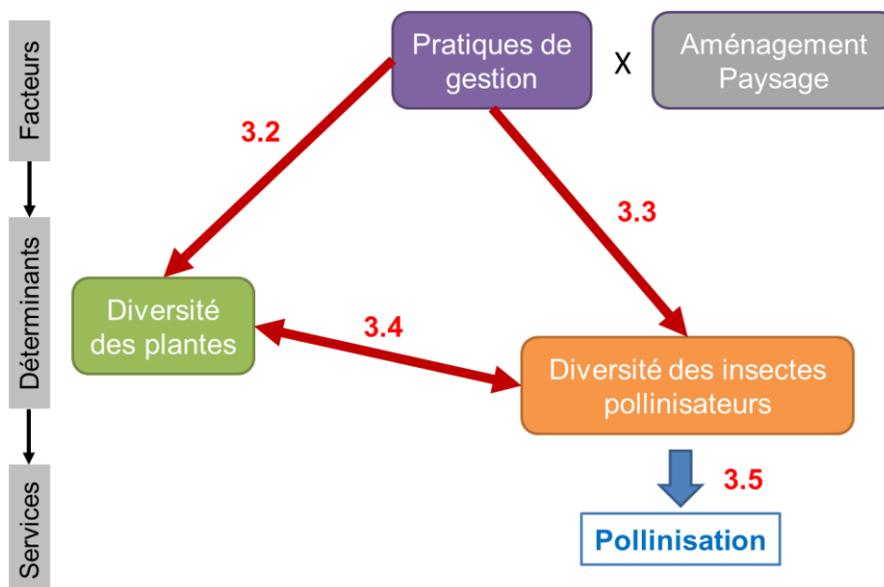


Figure 24. Schéma des relations étudiées pour l'analyse fonctionnelle des interactions plantes-pollinisateurs et du service de pollinisation. Les numéros correspondent aux paragraphes qui seront traités dans cette thématique.

3.2. Effet des pratiques de gestion sur la diversité des plantes et les traits floraux à l'échelle des communautés

Démarche scientifique

Les pratiques de gestion (fauche, pâture, fertilisation) influencent la diversité végétale des prairies permanentes. On sait par exemple que les fauches précoces (Gaujour et al., 2012) et l'augmentation de la fertilisation azotée (Jacquemyn et al., 2003) diminuent la richesse spécifique. Cependant il y a nettement moins d'informations sur l'effet de ces pratiques sur la diversité des traits floraux dans les prairies. En effet, la flore est traditionnellement caractérisée taxinomiquement y compris pour des enjeux de préservation de la biodiversité. Concernant l'approche fonctionnelle, comme nous l'avons précédemment évoqué, elle s'est beaucoup développée sur les traits végétatifs mais assez peu sur les traits floraux. Pourtant ces traits jouent un rôle essentiel dans le nombre et la diversité des visites des insectes pollinisateurs et dans la reproduction des plantes. **L'approche que nous avons développée est centrée sur la mesure des traits floraux de façon quantitative à l'échelle des communautés.** Elle allie l'approche d'écologie fonctionnelle des communautés à l'écologie de la pollinisation.

Principaux résultats

Lors de la thèse de Jérémie Goulnik (2016-2019) que j'ai co-encadrée avec Sylvain Plantureux (LAE), nous avons montré les relations possibles entre intensification agricole (augmentation de la défoliation et/ou augmentation de la fertilisation azotée) et traits floraux dans les prairies grâce à une synthèse bibliographique ([publication 15](#)). **L'intensification des pratiques agricoles peut entraîner un changement de couleur des fleurs, une diminution de la profondeur moyenne des tubes à nectar et une diminution de la production de récompenses et de la qualité du pollen au niveau de la communauté floristique (Figure 25).** Cependant, peu de données existent sur les mécanismes reliant intensification agricole et traits floraux pour les pollinisateurs. En particulier l'effet de l'intensification sur les odeurs florales et la qualité des récompenses florales a rarement été étudié.

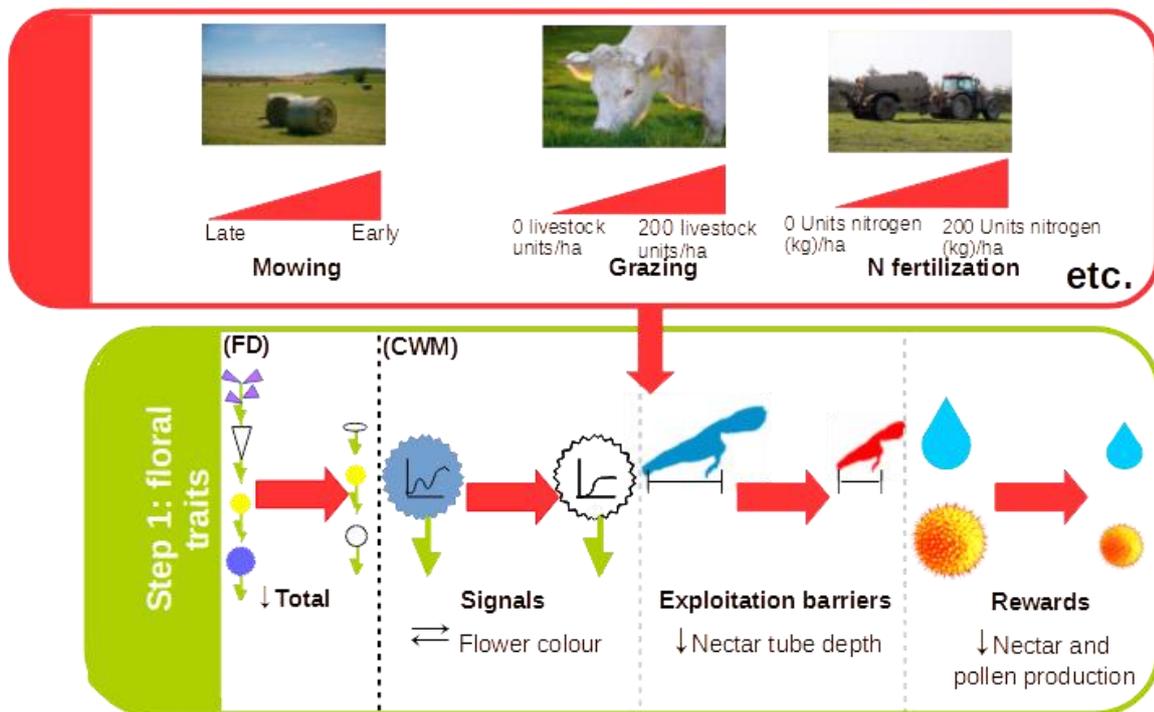


Figure 25. Relations entre intensification agricole et traits floraux à l'échelle des communautés. Source : Goulnik et al. (2021).

Afin de vérifier ces relations *in situ*, nous avons sélectionné un réseau de 16 prairies permanentes (**Figure 26**) situées dans un rayon de 12 km et proches de Sarrebourg en Moselle. **La sélection de ces parcelles a été réalisée pour éviter un effet trop fort de la composition du paysage autour des prairies.** En effet, les caractéristiques du paysage influencent la diversité et l'abondance des pollinisateurs, notamment le pourcentage d'habitats semi-naturels autour des parcelles (Steffan-Dewenter et al., 2002). Le paysage dans un rayon de 1000 m autour des centroïdes de prairies était constitué de plus de 30 % d'habitats semi-naturels (entre 32 et 82 %) et de moins de 30 % de grandes cultures (entre 0.69 % et 25.05 %).

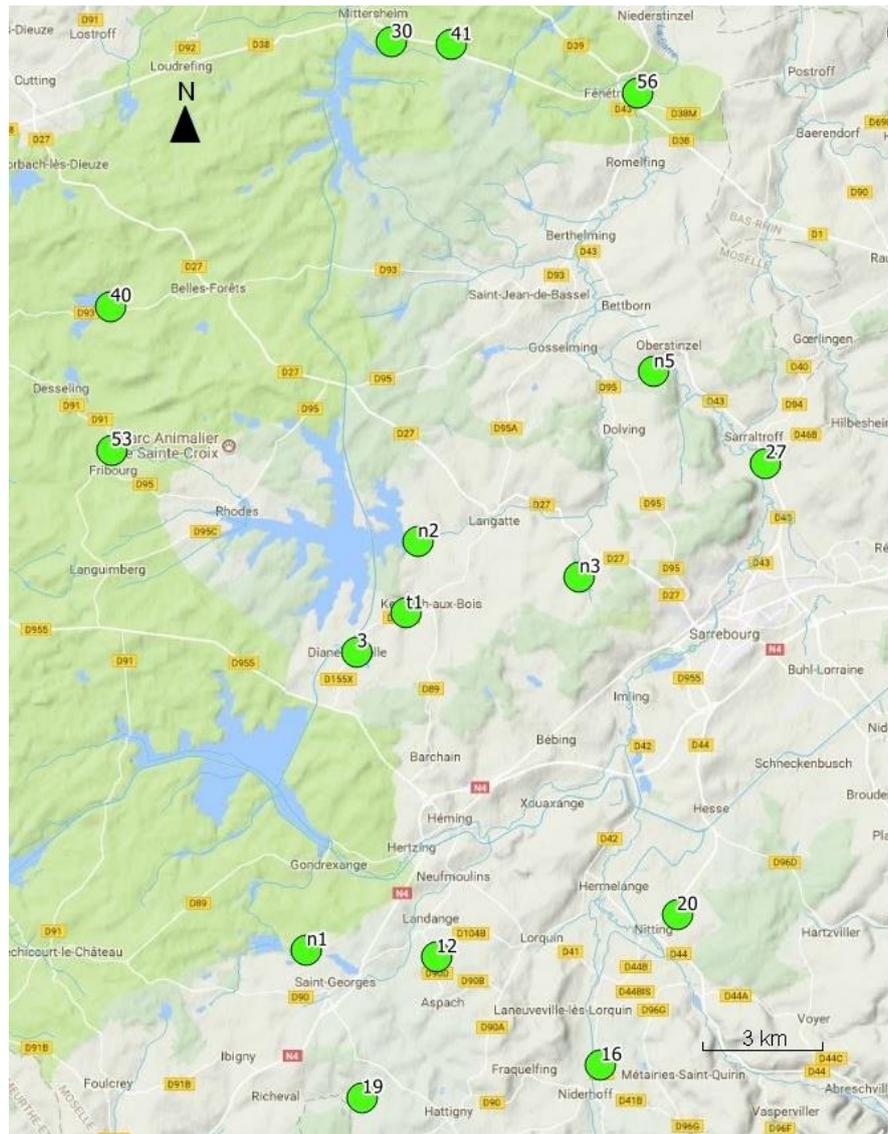


Figure 26. Carte des 16 parcelles de prairies permanentes étudiées lors de la thèse de Jérémie Goulnik, à proximité de Sarrebourg (Moselle).

Pour caractériser l'intensification agricole locale, nous avons agrégé trois variables : le pourcentage de défoliation due à la fauche ou au pâturage durant l'année d'échantillonnage, la fertilisation en azote total durant l'année d'échantillonnage et la date de première fauche en degrés jours (Goulnik, Plantureux, Thery, et al., 2020). La méthode d'agrégation a ensuite été établie par des règles de décision d'un panel d'experts. Nous avons également effectué des analyses de sol de 0 à 20 cm de profondeur sur chaque parcelle d'étude (trois points de prélèvements). Une analyse en composante principale a été réalisée avec les sept variables de sol et a montré un premier axe expliquant 65.8 % de la variance incluant le pH du sol, l'azote total, la teneur en carbone organique et la texture. Les coordonnées de cet axe ont été gardées pour l'analyse statistique reliant variables édaphiques et diversité fonctionnelle des traits floraux.

En utilisant des modèles linéaires mixtes, **nous n'avons pas trouvé de relation significative entre l'intensification agricole locale et la diversité fonctionnelle des traits floraux** (prenant en compte l'ensemble des traits : aire, hauteur, couleur, profondeur des tubes à nectar,

quantité de sucres dans les nectars) (**Figure 27**) (publications 16 et 17). Ce résultat peut être dû à un gradient de pratiques faible puisque les 16 prairies se trouvaient dans un contexte paysager principalement herbager avec une fréquence d'utilisation d'une à deux fauches par an, en fauche exclusive principalement et un ajout de fertilisation minérale azotée entre 0 et 198 kg N ha⁻¹ avec une majorité de parcelles sans intrant azoté minéral. En revanche, **nous avons mis en évidence une relation positive entre les variables édaphiques et la diversité fonctionnelle des traits floraux (p = 0.031) et une relation négative entre la teneur en phosphore des sols et la diversité fonctionnelle des traits floraux (p = 0.029, r²m = 0.18)**. Les prairies ayant les sols les plus fertiles (teneur en azote et matière organique les plus élevées) peuvent permettre une installation optimum de différentes espèces végétales et une augmentation de la diversité fonctionnelle florale puisque leur croissance n'est pas limitée. La teneur en phosphore est un élément fertilisant des sols qui favorise la croissance des plantes compétitives lorsqu'elle est élevée comme c'était le cas pour certaines parcelles. **Dans ces prairies à forte teneur en phosphore dans le sol, la compétition pour la lumière entrainerait une exclusion compétitive et une diminution de la diversité fonctionnelle florale des plantes** (Helsen et al., 2014).

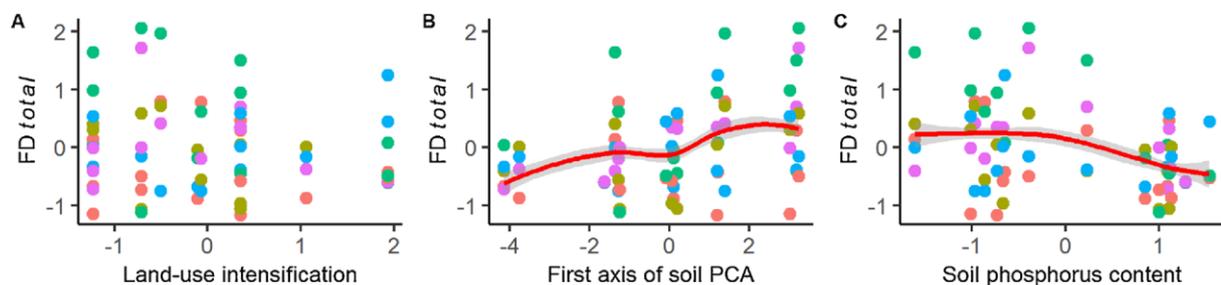


Figure 27. Ajustements prédits par les modèles linéaires mixtes entre la diversité fonctionnelle totale des traits floraux (FD total) et les variables environnementales locales (intensification agricole et variables édaphiques). Les couleurs de points sont différentes selon la session de capture des pollinisateurs. Rose : mi-mai, moutarde : début juin, vert : mi-juin, bleu : début juillet et violet : début août. Les courbes rouges indiquent des relations significatives à 5 % entre les variables des modèles. La zone grisée indique l'intervalle à 95 % autour des valeurs prédites. Source : Goulnik, Plantureux, They, et al. (2020).

3.3. Effet des pratiques de gestion sur la diversité et l'abondance des pollinisateurs

Démarche scientifique

A l'échelle des parcelles, les pratiques de gestion (facteur local) peuvent influencer les communautés de pollinisateurs. **Ainsi, la diversité et l'abondance des pollinisateurs diminuent lorsque l'intensité des fauches, l'intensité du pâturage ou la fertilisation minérale augmentent** (Hudewenz et al., 2012; Lazaro et al., 2016; Sjödin et al., 2008) avec des changements dans les communautés florales. A plus large échelle, la composition et la configuration du paysage influencent également la diversité des pollinisateurs en prairie. **Dans les études qui analysent en même temps les effets locaux et paysagers des facteurs environnementaux sur les pollinisateurs, les résultats sont contrastés selon les taxons.** Par exemple les Lépidoptères et les Coléoptères semblent être plus influencés par les facteurs locaux que le paysage contrairement aux syrphes. Les abeilles sont, elles, influencées par les deux types de facteurs (Kormann et al., 2015; Sjödin et al., 2008). **Notre approche a consisté**

à étudier l'effet de ces facteurs locaux et paysagers sur les insectes pollinisateurs de prairies dans différentes régions françaises. Nous avons participé au projet Polipré (2015-2017), coordonné par Anne Farruggia (DSLPI INRAE), en collaboration avec cinq laboratoires de recherche et ma collègue Nadia Michel (LAE). Ce fût le premier projet auquel j'ai participé pour étudier les interactions plantes-pollinisateurs. Nous recherchions des effets communs des facteurs locaux et paysagers dans trois fermes expérimentales INRAE contrastés en termes de paysage agricole et de pratiques de gestion : Mirecourt, Marcenat et Lusignan (**Figure 28**). Pour cela nous avons étudié six parcelles de prairies permanentes et temporaires dans les trois fermes. Pour la partie expérimentale sur le site de Mirecourt que j'ai coordonnée, les parcelles ont été choisies afin de (1) représenter un gradient de richesse floristique, (2) maximiser la diversité floristique, (3) ne pas être accolées (afin d'éviter l'autocorrélation spatiale), (4) présenter des pratiques de gestion différentes, (5) éviter la proximité d'éléments paysagers particuliers (forêt, haies, rivière, ...).

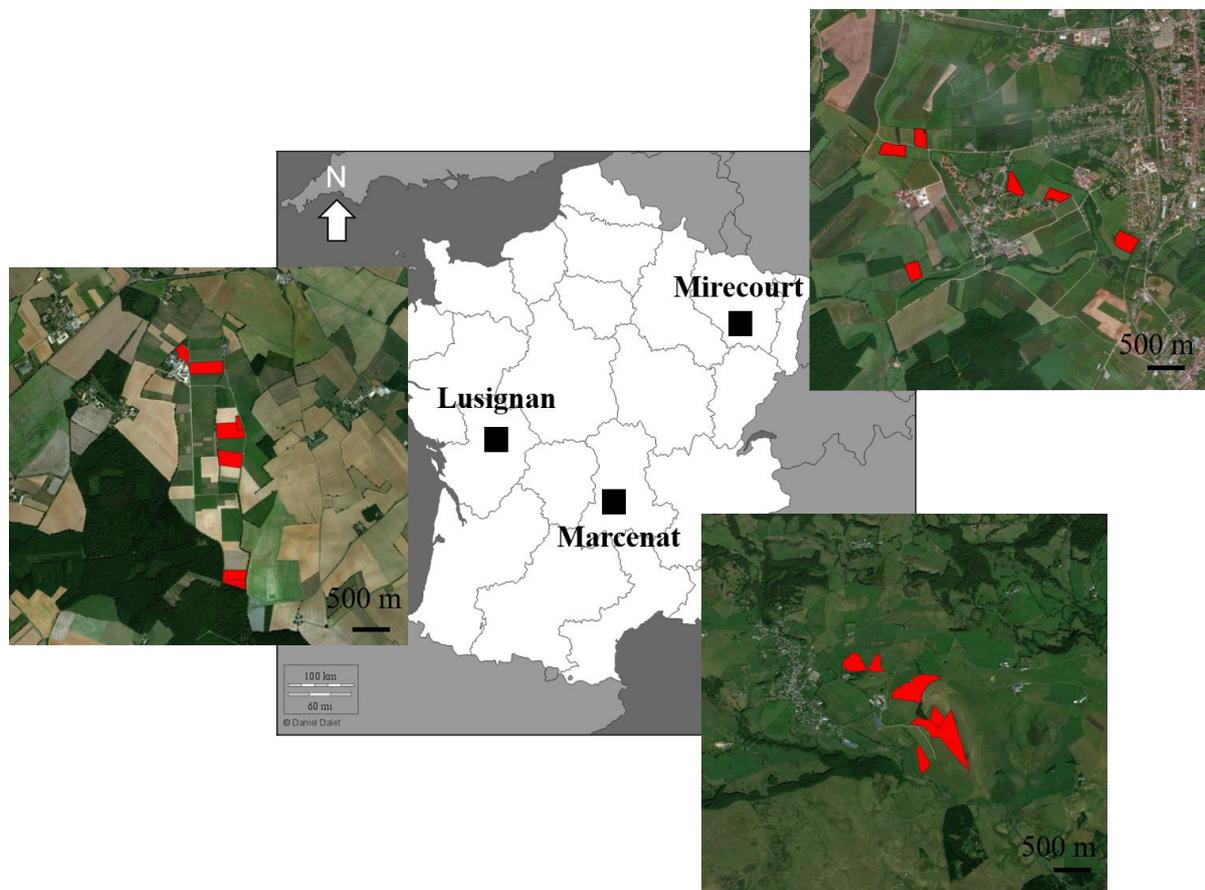


Figure 28. Localisation des 18 parcelles étudiées pour le projet Polipré. Source : Michelot-Antalik et al. (2021)

Principaux résultats

Neuf-cent-soixante-dix-neuf insectes pollinisateurs (en butinage actif) ont été capturés en 2015 (Marcenat) et 2016 (Mirecourt et Lusignan) sur trois sessions et 53 espèces de plantes différentes ([publication 18](#)). 107 espèces différentes d'insectes ont pu être identifiées. **La majorité des interactions plantes-pollinisateurs était réalisée par des Diptères (principalement Empididae et Syrphidae) sur les sites de Marcenat et Mirecourt (Figure 29)**

dont les parcelles étaient exclusivement des prairies permanentes. **Ces Diptères semblent donc jouer un important dans la pollinisation en prairie bien qu'ils soient moins étudiés dans la littérature.**

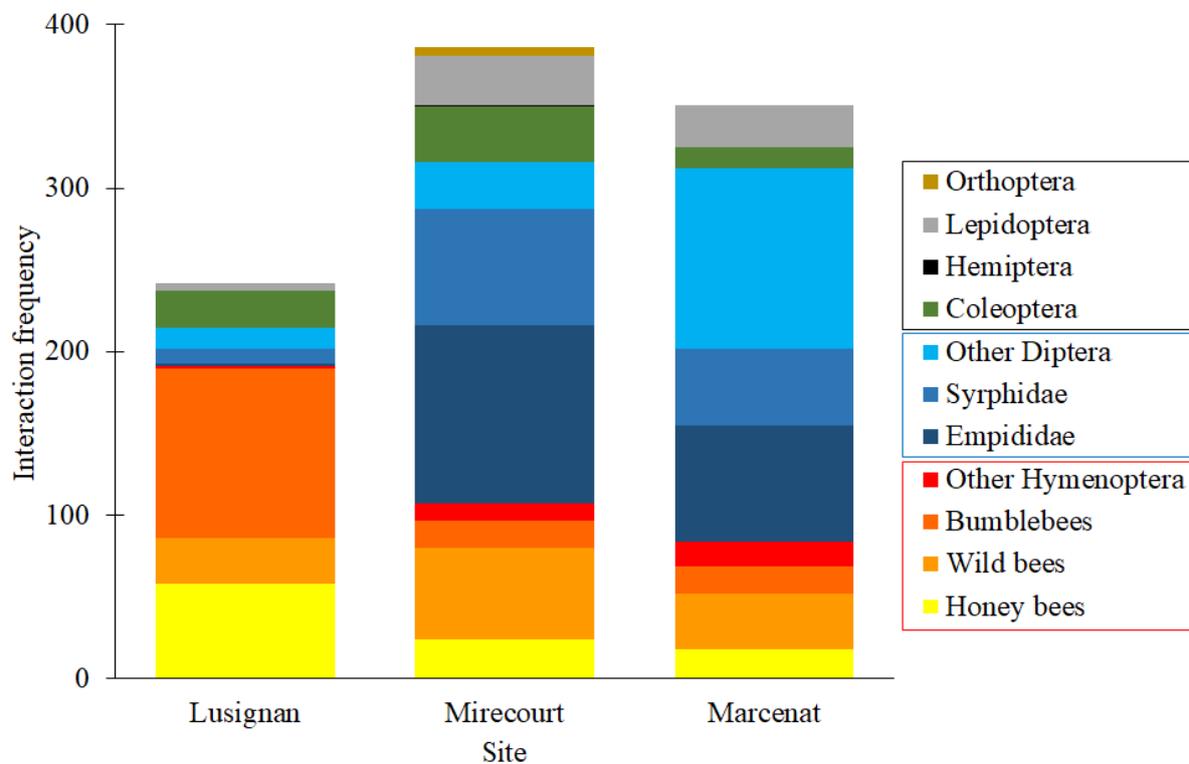


Figure 29. Fréquence d'interactions des pollinisateurs selon les morphotypes pour les trois sites d'étude : Lusignan, Mirecourt et Marcenat. Source : Michelot-Antalik et al. (2021).

D'après une analyse de redondance, **le pourcentage d'habitats semi-naturels dans un rayon de 500 m autour des parcelles et la hauteur de végétation expliquent 23 % de la variance de l'abondance des pollinisateurs (Figure 30)**. La composition des communautés d'insectes entre sites est cependant différente : les Diptères sont abondants dans les prairies permanentes situées dans des paysages avec un fort pourcentage d'habitats semi-naturels tandis que les Hyménoptères, plus particulièrement les abeilles polylectiques, sont dominantes dans les prairies temporaires entourées majoritairement de cultures. D'après une partition de variances, les variables locales (hauteur de végétation, richesse des plantes fleuries et fertilisation azotée), le pourcentage d'habitats semi-naturels dans un rayon de 500 m autour des parcelles et les deux types de variables (i.e. locale et paysagère) expliquent respectivement 9 %, 9 % et 8 % de la variance de l'abondance des pollinisateurs. Les facteurs locaux et paysagers expliquent donc une part réduite de la variation d'abondance des pollinisateurs des 18 prairies. Les compositions des communautés de pollinisateurs sont très différentes entre les régions et certains filtres environnementaux et biotiques sont propres à chaque site.

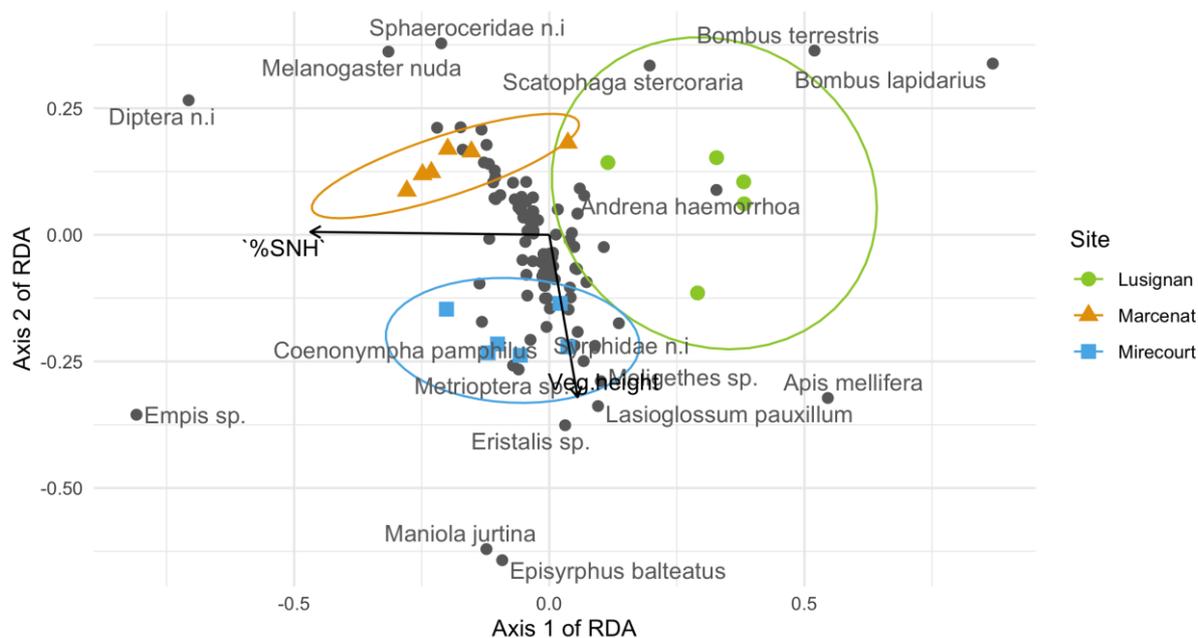


Figure 30. Triplot de distance des deux axes significatifs de l'analyse de redondance. Les flèches noires sont les variables explicatives. %SNH : pourcentage d'habitats semi-naturels dans un rayon de 500 m autour des parcelles, Veg.height : hauteur moyenne de la végétation (cm). Les ellipses représentent les intervalles de confiance à 95 % pour les parcelles de chaque site. Les points gris représentent les taxons d'insectes. Seuls les noms des insectes les plus abondants sont indiqués sur le graphique. Source : Michelot-Antalik et al. (2021)

3.4. Relations entre la diversité des plantes et la diversité et l'abondance des pollinisateurs

3.4.1. Approche taxinomique

Démarche scientifique

Les interactions entre plantes et pollinisateurs résultent d'une co-évolution. Elles sont mutualistes et organisées en réseaux bipartites. Les espèces de ces réseaux peuvent être spécialistes (i.e. elles interagissent avec peu d'espèces différentes) ou généralistes (i.e. elles interagissent avec de nombreuses espèces différentes). **Les réseaux plantes-pollinisateurs sont généralement imbriqués** (Bascompte et al. 2003) : des espèces spécialistes interagissent avec un sous-ensemble d'espèces avec lesquelles les espèces généralistes interagissent (**Figure 31**) et **asymétriques** : des espèces spécialistes ont tendance à interagir avec des espèces généralistes Alarcón (2010).

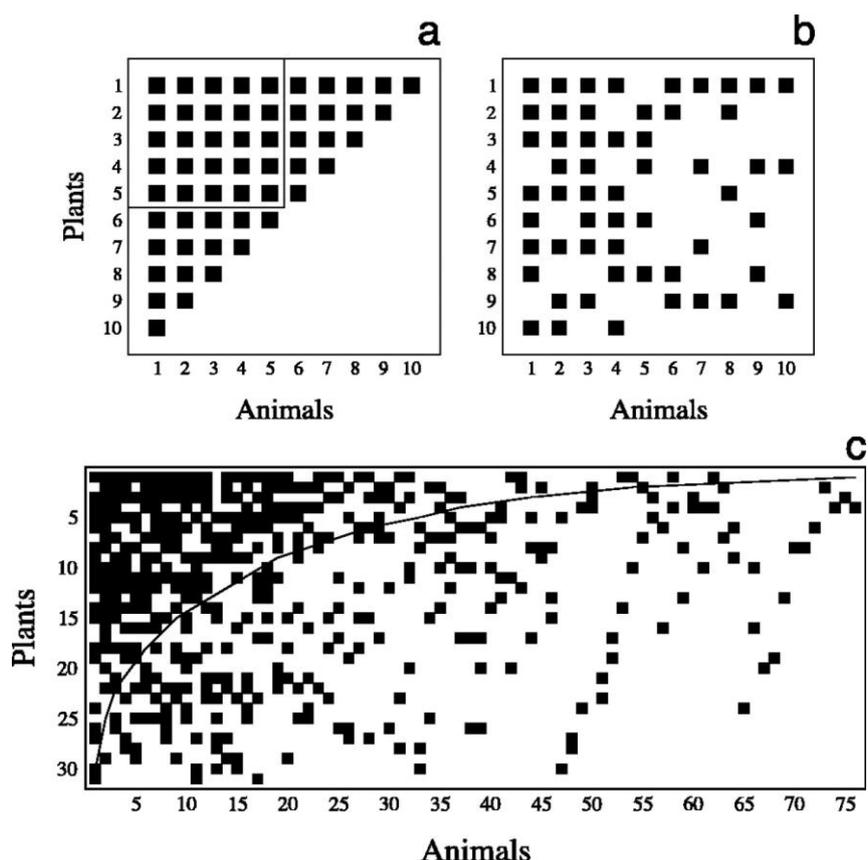


Figure 31. Matrices d'interactions mutualistes plantes-animaux. Les nombres indiquent les espèces végétales et animales qui sont rangées dans un nombre décroissant d'interactions par espèce. Un carré noir indique une interaction observée entre une plante i et un animal j . Les figures (a) à (c) correspondent respectivement à une matrice parfaitement imbriquée, aléatoire et proche de la réalité observée. Les valeurs d'imbrication (nestedness en anglais) sont $N = 1$ (a), $N = 0.55$ (b) et $N = 0.742$ ($P < 0.01$). La boîte encadrée en (a) représente le centre du réseau, et la ligne en (c) représente l'isocline d'imbrication parfaite. Dans un scénario parfaitement imbriqué, toutes les interactions se situeraient avant l'isocline (sur le côté gauche). Source : Bascompte et al. (2003).

Ces propriétés peuvent rendre les réseaux plus stables aux extinctions d'espèces, à la perturbation et aux pertes d'habitats (Jordano 1987; Memmott et al. 2004; Fortuna et Bascompte 2006). L'identité des espèces végétales présentes dans les communautés prairiales influence donc la diversité et l'abondance des insectes pollinisateurs. **L'analyse des réseaux permet d'identifier les espèces végétales qui les structurent majoritairement** et qui ont un rôle clé dans les interactions plantes-pollinisateurs.

A l'échelle des communautés, une augmentation de l'abondance des plantes fleuries peut augmenter l'abondance des pollinisateurs et leur diversité (e.g. Ebeling et al. 2008; Hudewenz et al. 2012). Des études ont également démontré que l'augmentation de la richesse spécifique des espèces végétales augmente la richesse spécifique des pollinisateurs ou leur fréquence de visites (Fornoff et al., 2017; Fründ et al., 2010). En effet, plus les ressources florales sont diversifiées, plus les niches écologiques sont nombreuses pour les pollinisateurs (Junker et al., 2015).

Notre approche taxinomique a donc consisté à identifier les espèces végétales structurantes des réseaux plantes-pollinisateurs en prairies et à comprendre les relations entre diversité

des plantes et diversité et abondance des pollinisateurs. Cette approche taxinomique étant un préalable à une approche fonctionnelle plus mécaniste qui sera présentée ensuite.

Principaux résultats

Sur les 16 prairies lorraines suivies lors de cinq périodes de capture en 2017 dans la thèse de Jérémie Goulnik, les espèces végétales qui représentent 75 % d'interactions sont au nombre de 8 : *Centaurea jacea* : 17.1 % *Daucus carotta* : 15.1 %, *Trifolium repens* : 13.3 %, ***Silaum silaus*** : 8.1 %, *Ranunculus acris* : 7.2 %, *Lotus corniculatus* : 6.8 %, *Jacobe aquatica* : 6.2 % et *Trifolium pratense* : 5.2 %. Nous pouvons comparer ces résultats à ceux du projet Polipré dans la même région (site de Mirecourt) en sélectionnant des périodes de captures similaires. Il est intéressant de constater que dans ce cas **les deux espèces les plus visitées sont similaires entre les deux études : *Centaurea jacea* et *Ranunculus acris***. Les espèces les plus visitées changent en partie seulement selon les régions et le type d'habitat. Ainsi, à Lusignan (prairies temporaires principalement), *Trifolium repens* et *Cirsium palustre* représentent 72 % des espèces visitées par les pollinisateurs et à Marcenat, ***Ranunculus sp.*, *Knautia arvensis*** et *Anthriscus sylvestris* représentent 42 % des espèces visitées. En analysant les plantes les plus visitées dans quatre sites français aux habitats prairiaux contrastés en zone Natura 2000 en 2020 pour le projet Polliflor (Lorraine : mésophile, Cotentin : marais, Somme : calcicole, Puys : montagne), nous retrouvons une partie de ces espèces : ***Centaurea jacea*, *Silaum silaus*** et ***Leucanthemum vulgare*** pour la Lorraine, *Carum verticillum*, *Ranunculus flamulus* et *Oenanthe fistulosus* pour le Cotentin, *Galium mollugo*, *Galium pulmillum* et *Leontodon hispidus* pour la Somme, ***Knautia arvensis*, *Leucanthemum vulgare*** et *Calluna vulgaris* pour les Puys. Ces informations sont précieuses pour la conservation des pollinisateurs dans les prairies permanentes. **Elles permettent aux gestionnaires d'identifier les espèces structurantes des réseaux.** Cette approche m'a permis d'être sollicitée pour un travail d'expertise sur la pollinisation des prairies du Massif Central (Galliot et al., 2020).

Les travaux réalisés dans Polipré ont montré que l'abondance des pollinisateurs est corrélée positivement à l'abondance des plantes fleuries ($r_s = 0.48$, $p < 0.001$) et à la richesse spécifique des plantes fleuries ($r_s = 0.60$, $p = 0.011$) à l'échelle des communautés étudiées. Les communautés comportant des ressources florales abondantes et diversifiées semblent donc plus attractives pour les pollinisateurs. Les résultats obtenus dans la thèse de Jérémie Goulnik apportent des informations supplémentaires sur cette relation. En effet, **nous avons montré que ces relations entre diversité floristique et abondance des pollinisateurs n'étaient pas forcément linéaires (Figure 32c)**. A partir de 30 % de recouvrement fleuri, il y a une relation négative entre l'abondance des plantes fleuries et le nombre de visites d'insectes par unité de temps (fréquence d'interactions). Concernant la diversité des pollinisateurs, nous avons également trouvé **une relation quadratique positive entre le pourcentage de recouvrement fleuri et la richesse spécifique des pollinisateurs jusqu'à 20 % de recouvrement puis négative** ($p < 0.001$). Ce processus peut s'expliquer par la dominance d'espèces moins attractives dans le recouvrement fleuri comme *Galium mollugo* ou potentiellement à pollen toxique comme *Ranunculus acris* (Praz et al. 2008) pour les communautés à fort recouvrement.

La relation linéaire positive entre la richesse spécifique des plantes fleuries et la fréquence d'interactions des insectes est vérifiée jusqu'à six espèces fleuries dans la parcelle prairiale mais ensuite il n'y a plus de relation contrairement à l'étude d'Ebeling et al. (2008) (Figure 32d). Treize des 27 communautés prairiales présentant plus de six espèces fleuries différentes

étaient dominées par *G. mollugo* ou *R. acris* qui pourraient être moins attractives selon certains traits floraux.

Ces travaux mettent en évidence la nécessité d'étudier plus finement, grâce à une approche fonctionnelle, les mécanismes des relations entre diversité végétale et diversité des pollinisateurs. En particulier, dans l'optique d'aménagement des prairies et des paysages agricoles, il semble essentiel de caractériser les espèces florales par leur attractivité ou leur valeur nutritive pour les insectes, au-delà de leur simple identification taxinomique.

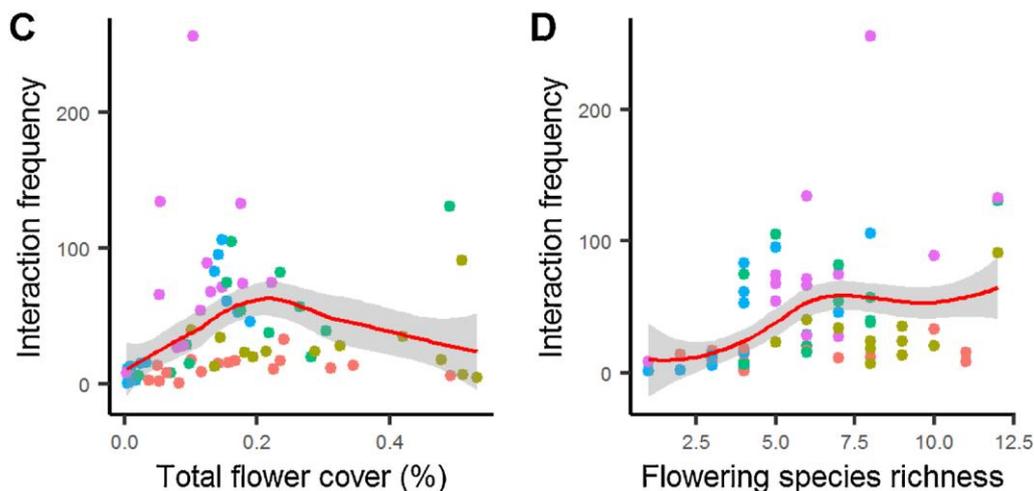


Figure 32. Ajustements prédits par les modèles linéaires mixtes entre la fréquence des interactions plantes-pollinisateurs et le pourcentage de recouvrement fleuri (C) et la richesse spécifique des espèces fleuries (D). Les couleurs de points sont différentes selon la session de capture des pollinisateurs. Rose : mi-mai, moutarde : début juin, vert : mi-juin, bleu : début juillet et violet : début août. Les courbes rouges indiquent des relations significatives à 5 % entre les variables des modèles. La zone grisée indique l'intervalle à 95 % autour des valeurs prédites. Source : Goulnik, Plantureux, They, et al. (2020).

3.4.2. Approche fonctionnelle

Démarche scientifique

Nous avons vu que certaines variables comme les déterminants édaphiques ou les pratiques de gestion (effet intensification agricole) peuvent modifier les valeurs de traits floraux dans les communautés prairiales. **Ces changements de traits floraux ont-ils un impact sur l'abondance et la diversité des pollinisateurs ?** Nous pouvons faire deux hypothèses pour répondre à cette question. La première est l'**hypothèse de mass-ratio** (cf. partie 2.2). Si nos données répondent à cette hypothèse, l'abondance et la diversité des pollinisateurs peuvent être influencées par la valeur moyenne des traits floraux à l'échelle des communautés prairiales. Pour vérifier cette hypothèse, nous calculons la CWM (Community Weighted Mean) pour chaque trait floral et chaque communauté tel que :

$$CWM = \sum_{i=1}^S p_i x_i$$

où p_i est l'abondance de l'espèce i sur l'abondance totale de la communauté et x_i est la valeur moyenne du trait floral pour l'espèce i .

Dans cette hypothèse, les espèces fleuries abondantes ont une influence importante.

La deuxième hypothèse est **la complémentarité de niches** (cf. p. 31). L'existence d'une grande diversité de traits floraux au sein d'une communauté serait le résultat d'une différenciation des niches écologiques, entraînant une baisse de la compétition et une complémentarité entre les espèces de pollinisateurs dans l'acquisition des ressources, leur permettant de coexister dans un même habitat. Si nos données répondent à cette hypothèse, l'abondance et la diversité des pollinisateurs peuvent être influencées par la diversité fonctionnelle des traits floraux à l'échelle des communautés prairiales. Les méthodes de calcul de la diversité fonctionnelle sont nombreuses dans la littérature. Dans les résultats présentés ci-après, nous avons utilisé l'indice de Rao (FD_Q) pour chaque trait floral et chaque communauté et pour l'ensemble des traits floraux.

$$FD = \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^S d_{ij} p_i p_j$$

où d_{ij} est la dissimilarité entre l'espèce i et l'espèce j , p_i est l'abondance relative de i , p_j est l'abondance relative de j .

Pour éviter la corrélation entre le FD_Q et la diversité taxinomique, nous avons créé des modèles nuls (détaillés dans Goulnik, Plantureux, Thery, et al., 2020). Ces modèles nuls permettent de calculer ensuite des SES (standardised effect sizes) en utilisant la formule suivante :

$$SES.FDQ = \frac{ObservedFDQ - mean(nullmodelsFDQ)}{sd(nullmodelsFDQ)}$$

où sd est l'écart-type.

Ce sont ces valeurs de SES.FDQ qui seront mises en relation avec les valeurs d'abondance de pollinisateurs.

Les deux études ayant précédemment testées les relations entre diversité fonctionnelle des traits floraux et fréquence des interactions plantes-pollinisateurs ont trouvé une relation négative. A la différence de notre étude *in-situ* sur 16 prairies permanentes, elles sont établies sur des sites expérimentaux d'assemblages d'espèces végétales dans des micro-parcelles (Jena : Fornoff et al., 2017 ; Gembloux : Uyttenbroeck et al. 2017) et ont des communautés de pollinisateurs relativement peu diversifiées et dominées par des pollinisateurs généralistes (*Apis mellifera* et bourdons). Pour vérifier ces relations nous avons mesuré différents traits floraux : la réflectance, la hauteur florale, l'aire florale, la profondeur des tubes à nectar et la quantité de sucres par fleur en 24 h dans les nectars en collaborant avec Mathilde Baude (IEES) et Marc Théry (MECADEV).

Principaux résultats

Sur 16 prairies permanentes lorraines, nous avons capturé 2823 pollinisateurs (dont 44 % d'Hyménoptères et 40 % de Diptères) butinant les fleurs à cinq périodes de l'année 2017 (**Figure 33**). Aucune relation n'a été trouvée entre les CWM des traits floraux et l'abondance des pollinisateurs. En revanche, **nous avons mis en évidence pour la première fois en conditions *in-situ* que l'augmentation de la diversité fonctionnelle des fleurs favorise significativement l'abondance des pollinisateurs en prairie tempérée** (R^2 modèle = 0.35, avec

le recouvrement fleuri comme autre variable explicative, **Figure 34a**). Plus particulièrement, **la diversité fonctionnelle de la quantité de sucres dans les nectars floraux semble influencer significativement l'abondance des pollinisateurs** (R^2 modèle = 0.43, avec le recouvrement fleuri comme autre variable explicative, **Figure 34b**). Nos résultats contribuent à l'étude des relations entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes. Ils soulignent l'importance de la diversité fonctionnelle florale pour favoriser l'abondance des pollinisateurs indépendamment de la richesse spécifique végétale et dans un contexte de déclin des insectes. L'hypothèse de complémentarité de niches peut être confirmée par ces résultats. Plus particulièrement, **la diversité des quantités de sucres dans les fleurs semble être un facteur prépondérant pour la complémentarité de niches des pollinisateurs**, probablement du fait de leurs besoins métaboliques différents (Vaudo et al., 2015).

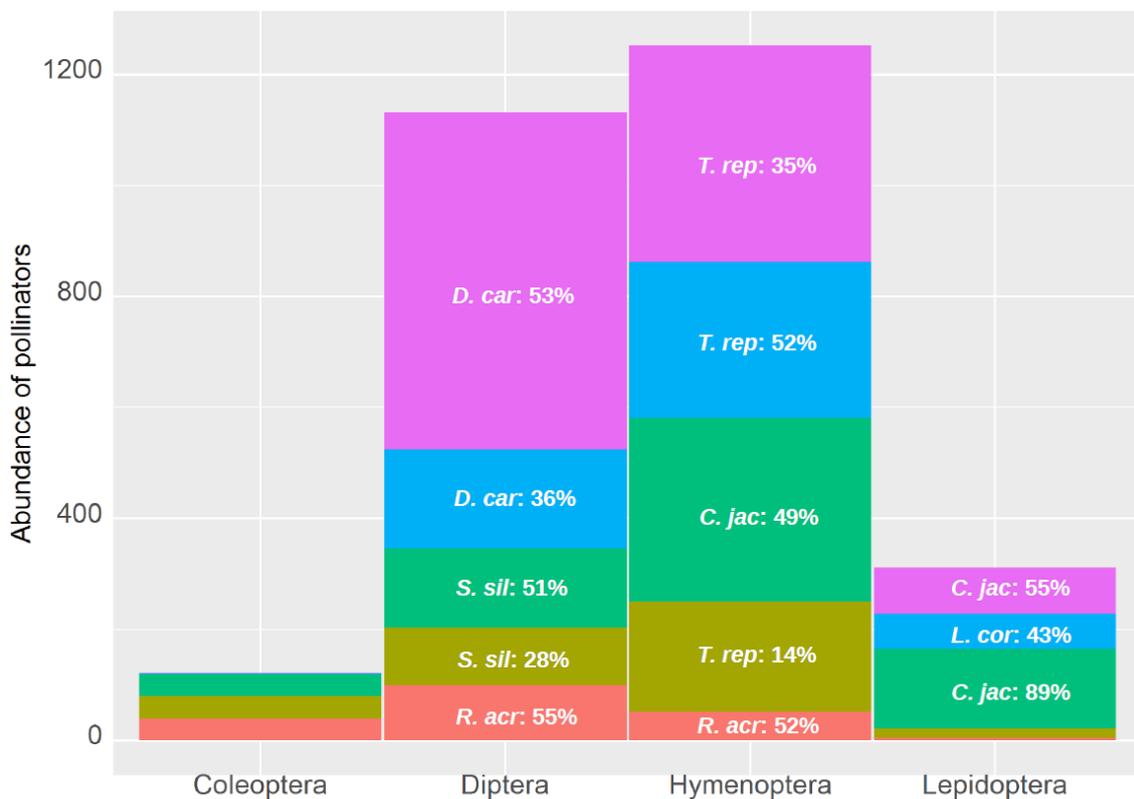


Figure 33. Abondance des insectes pollinisateurs selon les 4 ordres principaux par session de capture. Rose : mi-mai, moutarde : début juin, vert : mi-juin, bleu : début juillet et violet : début août. Les espèces végétales les plus visitées pour chaque session et chaque ordre sont indiquées en blanc avec le pourcentage de visites correspondant. R. acr : *Ranunculus acris* ; S. sil : *Silaum silaus* ; D. car : *Daucus carota* ; T. rep : *Trifolium repens* ; C. jac : *Centaurea jacea* ; L. cor : *Lotus corniculatus*. Source : Goulnik, Plantureux, They, et al. (2020).

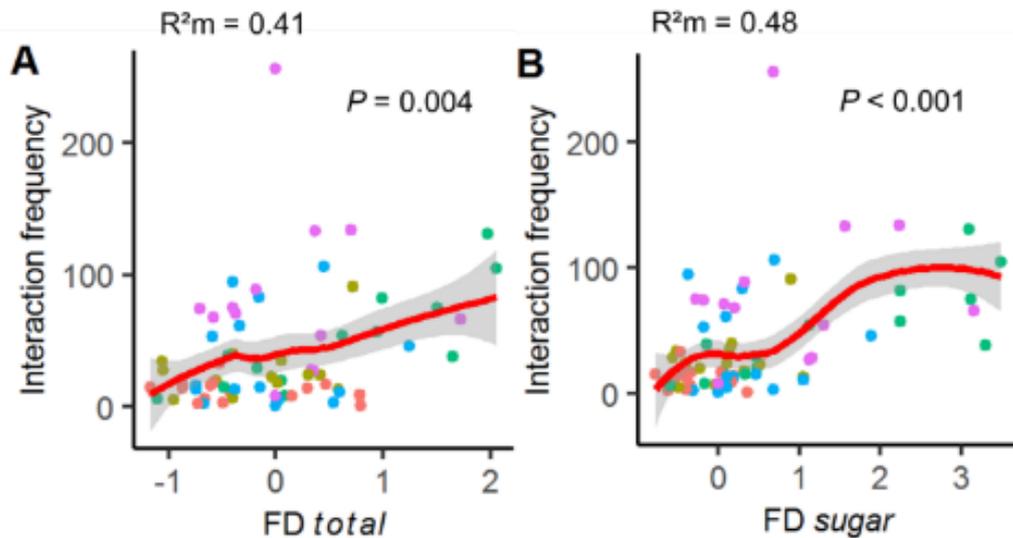


Figure 34. Ajustements prédits par les modèles linéaires mixtes entre la fréquence des interactions plantes-pollinisateurs et la diversité fonctionnelle des traits floraux (A) et la diversité fonctionnelle de la quantité de sucres dans les nectars (B). Les couleurs de points sont différentes selon la session de capture des pollinisateurs. Rose : mi-mai, moutarde : début juin, vert : mi-juin, bleu : début juillet et violet : début août. Les courbes rouges indiquent des relations significatives à 5 % entre les variables des modèles. La zone grisée indique l'intervalle à 95 % autour des valeurs prédites. Source : Goulnik, Plantureux, They, et al. (2020).

Nous avons ensuite étudié l'influence des traits floraux sur la richesse spécifique des pollinisateurs. Pour cela, des experts entomologistes ont identifié 247 espèces de pollinisateurs appartenant à 59 familles différentes sur les insectes capturés en 2017. La répartition des espèces pour les quatre principaux ordres d'insectes est présentée en **Figure 35**. **La richesse spécifique des pollinisateurs est reliée positivement à la richesse fonctionnelle de la quantité de sucres des nectars** ($p = 0.013$, $R^2m = 0.36$ avec un modèle mixte contenant également le recouvrement fleuri comme variable explicative, **Figure 36**). **Ce résultat souligne l'importance de la diversité des récompenses florales pour maximiser la diversité des espèces de pollinisateurs et la complémentarité de niches.**

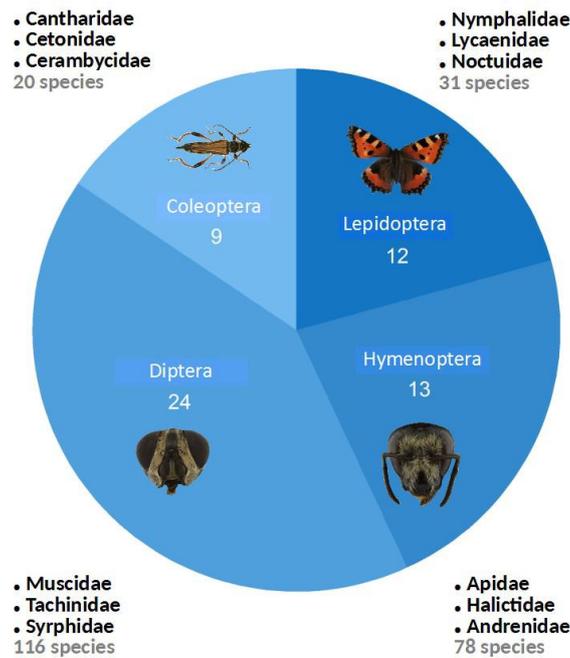


Figure 35. Répartition des espèces et familles selon les quatre principaux ordres d'insectes. Les familles inscrites en gras sont celles présentant le plus d'insectes. Les chiffres notés en blanc sont le nombre de familles différentes au sein de chaque ordre. Source : Goulnik (2019).

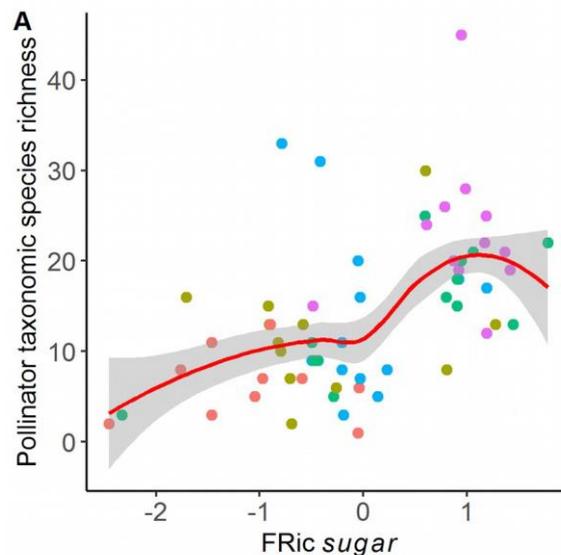


Figure 36. Ajustements prédits par le modèle mixte entre la richesse spécifique des pollinisateurs et la richesse fonctionnelle de la quantité de sucres dans les nectars. Les couleurs de points sont différentes selon la session de capture des pollinisateurs. Rose : mi-mai, moutarde : début juin, vert : mi-juin, bleu : début juillet et violet : début août. Les courbes rouges indiquent des relations significatives à 5 % entre les variables des modèles. La zone grisée indique l'intervalle à 95 % autour des valeurs prédites. Source : Goulnik (2019).

Pour aller plus loin, nous avons étudié les relations entre les traits floraux et la masse des insectes. La masse des insectes peut être un proxy des besoins métaboliques des insectes (Brown et al., 2004), de la longueur de langue des abeilles (Cariveau et al., 2016) et de la consommation en pollen des larves de certaines espèces d'abeilles (Müller et al., 2006). Elle

est également reliée à la distance de vol des insectes (Cariveau et al., 2016). Comme précédemment, le rôle des récompenses florales est également mis en évidence dans nos résultats. La CWM de la masse des pollinisateurs est positivement reliée à la CWM de la quantité de sucres ($\beta = 5.015$, $p\text{-value} = 7.51e-04$; **Figure 37A**) et au pourcentage de recouvrement fleuri ($\beta = 4.370$, $p = 0.003$; **Figure 37B**) en utilisant un modèle mixte linéaire ($R^2m = 0.28$, $R^2c = 0.36$). La CWM de la masse des pollinisateurs est aussi positivement reliée au CWM de la profondeur des tubes à nectar ($\beta = 6.427$, $p = 6.53e-06$; **Figure 37C**) et au pourcentage de recouvrement fleuri ($\beta = 3.651$, $p = 8.51E-03$; **Figure 3B**) en utilisant un modèle mixte linéaire ($R^2m = 0.34$, $R^2c = 0.52$).

Ces résultats valident l'hypothèse de mass-ratio en soulignant l'importance de la quantité de nectars et de la profondeur des tubes à nectar des espèces dominantes dans les prairies pour la masse des pollinisateurs butinant dans ces communautés. A notre connaissance, ces résultats sont rares dans la littérature et indiquent que les valeurs moyennes de traits floraux mesurées à l'échelle des communautés peuvent être de bons indicateurs de la biomasse des pollinisateurs butinant en prairie. Ils nécessitent des études de plus grande ampleur (i.e. dans des régions et habitats différents, avec plus de pollinisateurs observés) pour éprouver leur généralité.

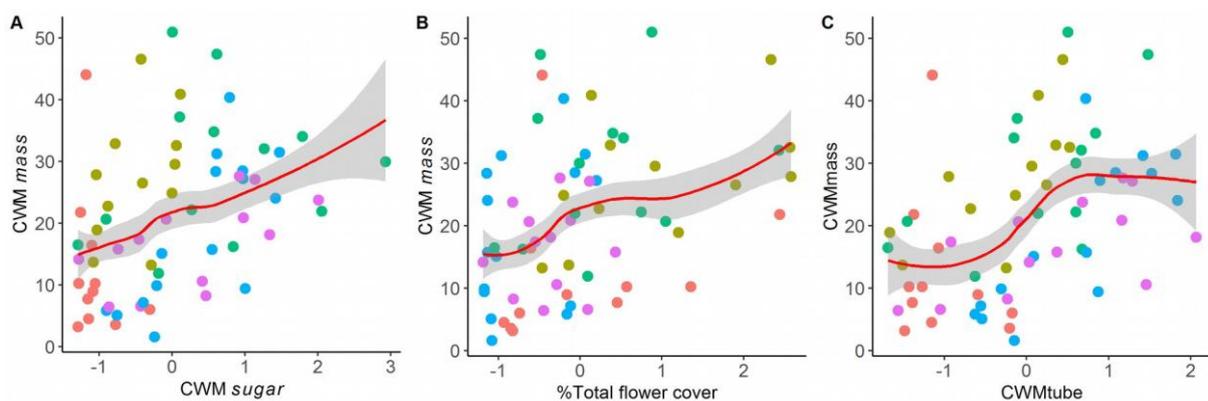


Figure 37. Ajustements prédits par les modèles linéaires mixtes entre la CWM de la masse des pollinisateurs et la CWM de la quantité de sucres dans les nectars (A), le pourcentage de recouvrement fleuri (B) et la CWM de la profondeur des tubes à nectar (C). Les couleurs de points sont différentes selon la session de capture des pollinisateurs. Rose : mi-mai, moutarde : début juin, vert : mi-juin, bleu : début juillet et violet : début août. Les courbes rouges indiquent des relations significatives à 5 % entre les variables des modèles. La zone grisée indique l'intervalle à 95 % autour des valeurs prédites. Source : Goulnik (2019).

3.5. Relations entre la diversité et l'abondance des pollinisateurs et la pollinisation

Démarche scientifique

La pollinisation des espèces cultivées est considérée comme un service écosystémique de régulation dans la typologie EFESE des agrosystèmes (Thérond et al., 2017). Nos travaux ne sont pas allés jusqu'à la quantification directe de ce service mais ils se sont intéressés à la fonction de pollinisation c'est-à-dire au transfert de pollen des étamines vers le stigmate des plantes à fleur. Comme présenté dans le cadre conceptuel de Bartholomée & Lavorel (2019) (**Figure 38**), **le transfert de pollen dépend de la biodiversité quantifiée de façon directe par**

la présence de pollinisateurs ou de façon indirecte par la présence de ressources florales et de sites de nidifications à l'échelle locale et paysagère.

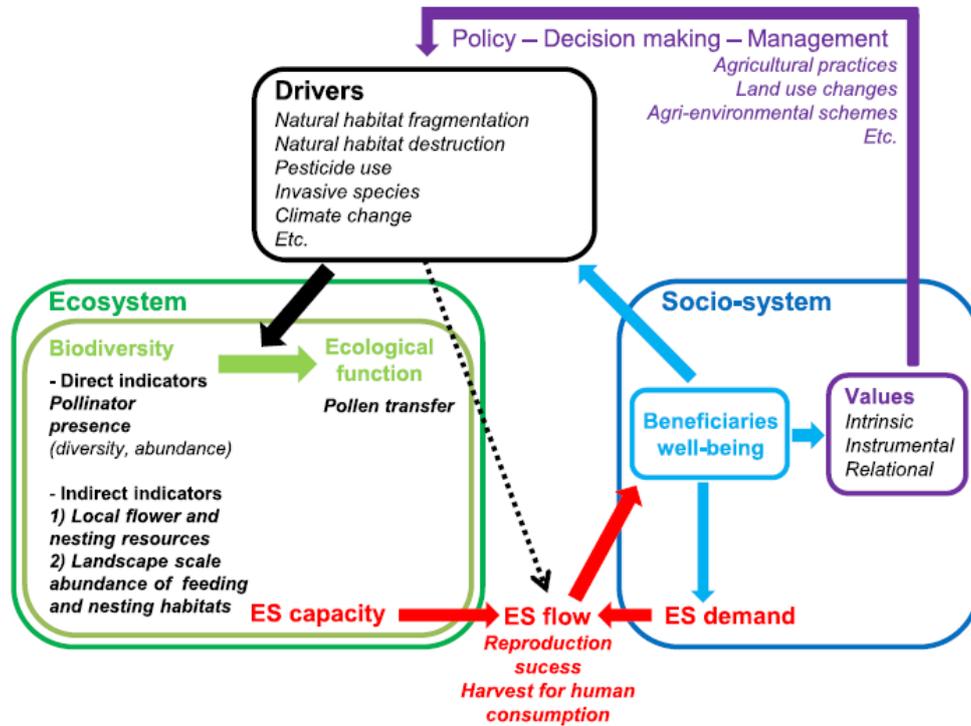


Figure 38. Cadre conceptuel du service de pollinisation. Les encadrés et flèches verts représentent les composantes de l'écosystème, les encadrés et flèches bleus représentent les composantes du socio-écosystème, les termes et flèches rouges représentent les services écosystémiques, les éléments violets représentent les valeurs des services écosystémiques et les actions/décisions qui en découlent et influencent les écosystèmes, les encadrés et flèches noirs représentent les facteurs influençant l'état des écosystèmes et les services écosystémiques de flux. Source : Bartholomée & Lavorel (2019).

Dans le cadre du projet Polipré (2015-2017), nous avons utilisé une méthode de **métagénomique** pour compléter notre analyse des réseaux plantes-pollinisateurs. Une collaboration avec le laboratoire EPGV a permis d'identifier jusqu'au genre les pollens récoltés sur les insectes par une analyse de barcoding.

Dans la thèse de Jérémie Goulnik, nous avons notamment utilisé l'**approche fonctionnelle pour établir des liens entre les traits des insectes et la fonction de pollinisation**. Une méthode de photographie a permis d'estimer la pilosité de la face des insectes (**Figure 39**). Ces travaux s'inscrivent ainsi de façon plus large dans la problématique des relations entre biodiversité et services écosystémiques au sein des agrosystèmes.

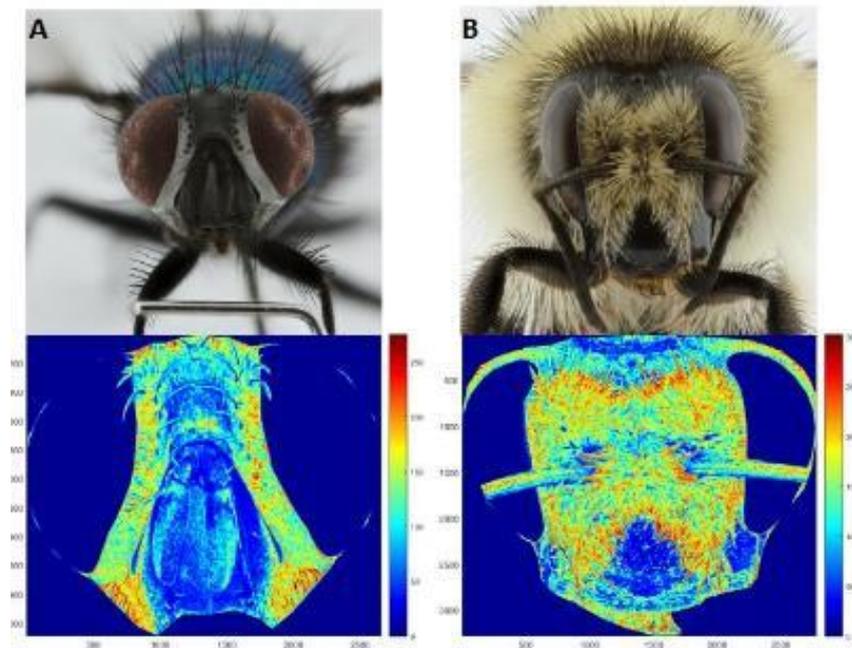


Figure 39. Photos de la face des insectes (Diptère, A), Hyménoptère (B) et estimations de la pilosité. © Jérémie Goulnik.

Principaux résultats

Les réseaux visuels d'observation plantes-pollinisateurs des trois sites (Lusignan, Mirecourt et Marcenat) ont permis d'identifier les espèces végétales visitées par les insectes. **L'analyse métagénomique des pollens transportés par ces insectes a permis d'identifier de 34 à 42 genres végétaux supplémentaires sur les trois sites (soit deux à trois fois la richesse taxinomique observée visuellement)**, complétant les interactions réalisées par les butineurs. La plupart des insectes (Diptères, Hyménoptères et Lépidoptères) transportaient d'un à trois genres végétaux différents dans les pollens récoltés avec un maximum de six genres différents sur un individu de *Pieris brassicae* (Lépidoptère). De plus, cette analyse semblait refléter les différences de composition des paysages autour des prairies. En effet, à Lusignan, les abeilles sauvages (Apidae, Halictidae et Andrenidae) transportaient des pollens d'arbres, d'arbustes, de dicotylédones prairiales et de cultures tandis que sur les deux autres sites les pollens transportés principalement par des Diptères et des Lépidoptères étaient davantage issus de plantes prairiales (Dicotylédones et Poacées). **Cependant, l'utilisation de ces méthodes de métabarcoding requiert la création d'une base locale pour avoir une correspondance exacte entre le barcode du pollen et l'identité de l'espèce végétale**, ce qui n'a pas été possible en utilisant les bases mondiales en 2016.

Dans l'étude de Goulnik, Plantureux, Reeth, et al. (2020) ([publication 19](#)), pour 109 espèces de pollinisateurs et 543 individus, nous avons montré que la masse des pollinisateurs et la surface de leur face avaient une relation quadratique positive (modèle mixte linéaire, $R^2m = 0.70$). Ainsi, **la surface de la face pourrait être un bon proxy de la taille des insectes** (puisque masse et taille du corps des insectes sont liés, Moretti et al. 2017) et de la quantité de pollen transporté. En mesurant des traits sur 40 espèces d'abeilles (*Anthophila*) et 87 espèces de Diptères butinant 36 espèces végétales, nous avons montré que **les abeilles ont des faces plus**

larges (modèle mixte linéaire $P < 2.58e-06$, $R^2m = 0.16$ **Figure 40A**), avec **plus de pilosité** (modèle mixte linéaire $P < 2e-16$, $R^2m = 0.51$, **Figure 40B**) et **transportent plus de pollen sur leur face** (modèle mixte linéaire généralisé $P < 2e-16$, $R^2m = 0.13$; **Figure 40C**) que les **Diptères**. Nous avons également mis en évidence que la quantité de pollen sur la face des insectes augmente lorsque la surface de la face ($P = 2.54e-10$; **Figure 41A**) et la pilosité de la face des insectes ($P = 0.001$; **Figure 41B**; modèle mixte linéaire généralisé $R^2m = 0.18$) augmentent lorsqu'on considère l'ensemble des pollinisateurs, avec un effet de groupe taxinomique (abeilles vs Diptères) qui influence fortement ces relations. Par conséquent, **les abeilles pourraient être plus efficaces dans le nombre de grains de pollen transportés** même si les autres parties du corps des insectes doivent être analysées en complément. De plus, **la surface de la face des insectes et sa pilosité peuvent être utilisées comme trait d'effet** (i.e. trait qui a une influence sur les propriétés et le fonctionnement des écosystèmes) pour estimer la fonction de pollinisation sur une diversité de pollinisateurs sauvages dans les agrosystèmes.

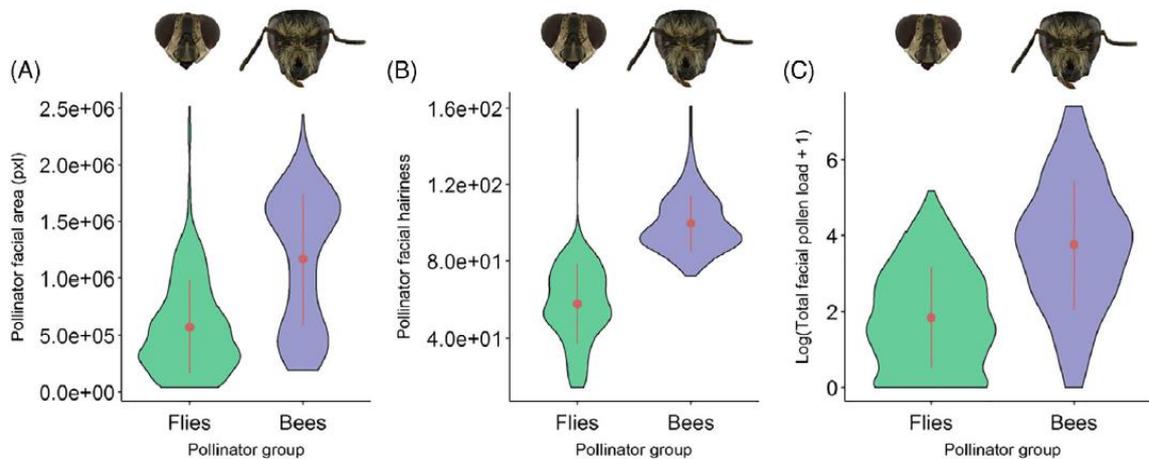


Figure 40. Graphiques de probabilité-densité représentant la moyenne (point) et l'écart-type (barre d'erreur) de la surface de la face des insectes (A), la pilosité de la face (B) et la quantité de pollen sur la face des insectes (transformation logarithmique) (C) des Diptères (vert) et des abeilles (violet). Les illustrations sont la face de *Sarcophaga carnaria* (x 5) et celle de *Bombus sylvarum* (x 4.5). Source : Goulnik, Plantureux, Reeth, et al. (2020).

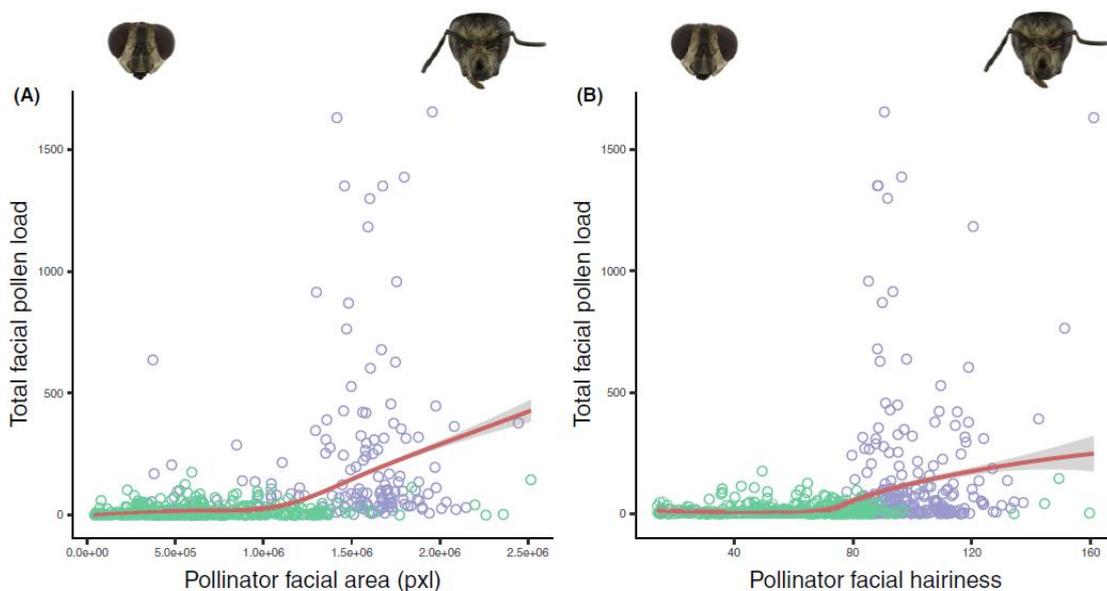


Figure 41. Quantité de pollen sur la face des insectes prédite par un modèle linéaire mixte généralisé avec comme variable explicative la surface de la face des insectes (A) et la pilosité de la face (B). La zone grisée indique l'intervalle à 95 % autour des valeurs prédites. Les cercles colorés indiquent les valeurs individuelles mesurées pour les Diptères (vert) et les Abeilles (violet). Source : Goulnik, Plantureux, Reeth, et al. (2020).

Bilan et perspectives

L'intensification des pratiques agricoles et la teneur en phosphore dans les sols peuvent modifier les traits floraux des communautés prairiales. **Ces changements peuvent avoir des conséquences sur les pollinisateurs dont l'abondance et la diversité dépendent du recouvrement fleuri et de la diversité fonctionnelle florale notamment celle de la quantité de nectar.** L'hypothèse de complémentarité de niches a donc été vérifiée sur un réseau de 16 prairies permanentes lorraines. La masse moyenne des pollinisateurs en prairie semble elle répondre à l'hypothèse de mass-ratio puisqu'elle est liée à la quantité de nectars et à la profondeur des tubes à nectar des espèces dominantes. **Les Diptères transporteraient moins de pollen que les abeilles sur leur face mais jouent un rôle important dans la pollinisation en prairie puisqu'ils visitent beaucoup de fleurs dans les différentes études réalisées. Le rôle de la diversité fonctionnelle florale semble prépondérant à étudier :** à la fois pour orienter la gestion des agrosystèmes vers une conservation fonctionnelle de la biodiversité des plantes et des pollinisateurs mais également pour comprendre les règles d'assemblage des pollinisateurs à l'échelle des communautés. Ces connaissances semblent au cœur de l'aménagement des territoires agricoles et des enjeux de compromis entre production et maintien de la biodiversité et seront une approche nécessaire au développement de mon projet.

Ces travaux **m'ont permis de développer des questions originales sur les interactions plantes-pollinisateurs grâce à des mesures de traits fonctionnels** sur les fleurs et les insectes en les agrégeant à l'échelle des communautés. Cette approche mécaniste facilite l'étude du service de pollinisation et de ses changements selon les facteurs environnementaux locaux et paysagers. Cette thématique m'a également permis de développer des collaborations

francophones (France, Belgique) notamment *via* le GDR (groupement de recherche) Pollineco. Des projets multi-partenaires ont pu se mettre en place et ont renforcé le socle de mes connaissances scientifiques. Ces échanges scientifiques ont hautement stimulé mes activités de recherche ces dernières années et ont grandement contribué à mon épanouissement professionnel. L'importance de l'effet des pratiques de gestion et de la composition végétale sur la biodiversité et les services écosystémiques m'a incitée à étudier des **pratiques favorisant la conservation de la biodiversité dans les écosystèmes dégradés** ce que je vais détailler dans la partie 4.

Publications

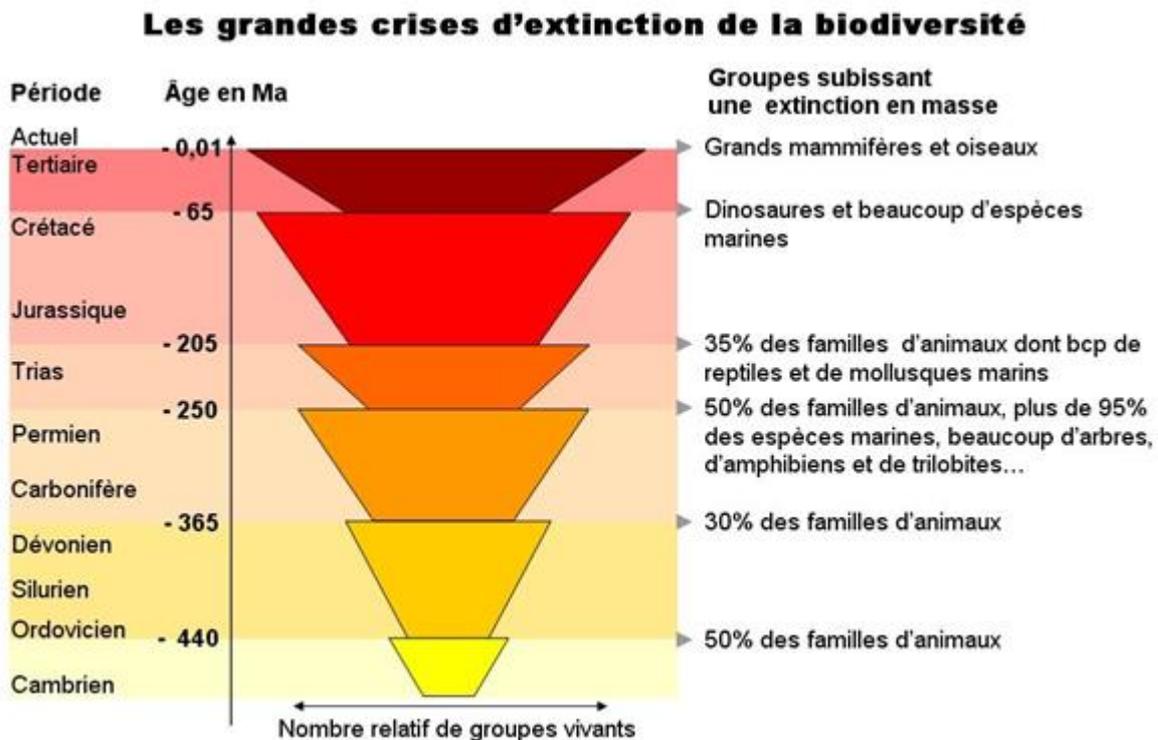
15. Goulnik, J., Plantureux, S., Dajoz, I., **Michelot-Antalik, A. (2021)**. Using Matching Traits to Study the Impacts of Land-Use Intensification on Plant–Pollinator Interactions in European Grasslands: A Review. *Insects*, 12 (8), 680 (1 citation)
16. Goulnik, J., Plantureux, S., They, M., Baude, M., Delattre, M., Van Reeth, C., Villerd, J., **Michelot-Antalik, A. (2020)**. Floral trait functional diversity is related to soil characteristics and positively influences pollination function in semi-natural grasslands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 301 (11 citations)
17. Goulnik, J., Plantureux, S., They, Baude, M., Delattre, M., Van Reeth, C., Villerd, J., **Michelot-Antalik, A. (2020)**. Pollination function is positively influenced by floral traits functional diversity in semi-natural grasslands, 28th General Meeting of the European Grassland Federation - 2020 EGF, 19-21 octobre 2020, Helsinki (Finlande)
18. **Michelot-Antalik, A.**, Michel, N., Goulnik, J., Blanchetête, A., Delacroix, E., Faivre-Rampant, P., Fiorelli, J.-L., Galliot, J.-N., Genoud, D., Lanore, L., Le Clainche, I., Le Paslier, M.-C., Novak, S., Odoux, J.-F., Brunel, D., Farruggia, A. (2021). Comparison of grassland plant-pollinator networks on dairy farms in three contrasting French landscapes. *Acta Oecologica*, 112 (2 citations)
19. Goulnik, J., Plantureux, S., They, Van Reeth, C., Baude, M., Mesbahi, G., **Michelot-Antalik, A. (2020)**. Facial area and hairiness of pollinators visiting semi-natural grassland wild plants predict their facial pollen load. *Ecological Entomology*, 45 (6 citations)

4. Restauration écologique par l'implantation d'espèces prairiales et valorisation de la biomasse

4.1. Contexte

Nous sommes dans la sixième crise d'extinction de masse des espèces depuis la création de la Terre (**Figure 42**). Cette crise, contrairement aux précédentes, est due à l'impact de l'Homme sur son environnement. Le taux d'extinction des espèces est estimée 1000 fois plus rapide que les crises précédentes avec des groupes taxinomiques particulièrement en déclin comme les amphibiens, les oiseaux et les grands mammifères (Pimm et al., 2014). L'érosion de la biodiversité touche les trois niveaux de biodiversité : génétique, spécifique et écosystémique. Elle est principalement due à la modification des habitats, aux invasions biologiques, au changement climatique, à la surexploitation des ressources, à la pollution et à l'eutrophisation. Les usages des terres les plus intensifs en termes d'exploitation sont les

infrastructures, les terres cultivées et les zones de pâturage (Shukla et al. 2019). **La vitesse de la dégradation des écosystèmes et des organismes qui y vivent en interaction nécessite de trouver des solutions rapides et efficaces soutenues par les politiques publiques.**



Source : Modifié d'après Robert Barbault, 2000, p. 43 et CNRS sagascience <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbiodyn/index.html>

Figure 42. Crises successives d'extinction globale des espèces depuis le Cambrien.

Dans ce contexte, l'aménagement de nos territoires et la restauration écologique sont des méthodes indispensables à mettre en place. Face à des organismes mobiles et à des territoires diversifiés en activités, l'aménagement nécessite une vision d'ensemble et connectée des habitats qui y sont présents (cultivés, prairiaux, ruraux, urbains...) **La restauration écologique est un processus qui m'a toujours intéressée car il fait le lien entre les problématiques d'érosion de la biodiversité et les problématiques de gestion des écosystèmes.** Elle peut être définie comme : « une action intentionnelle qui initie ou accélère l'autoréparation d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit par une perturbation » (Society for Ecological Restoration International, 2004). Mes travaux sur la restauration écologique sont complémentaires à mes activités de recherche sur les agrosystèmes. Ils m'ont permis d'appliquer mes connaissances en écologie végétale des communautés à d'autres écosystèmes (milieu urbain, friche industrielle, talus ferroviaire) que les prairies permanentes et ont constitué pour moi une ouverture essentielle notamment en termes de partenariats locaux.

4.2. Démarche scientifique

Je me suis intéressée à une perturbation biotique : l'introduction d'espèces végétales invasives. Mes travaux se sont centrés sur les méthodes de lutte écologique contre la Renouée du Japon (*Reynoutria japonica*). Cette thématique a été initiée par une collaboration en

enseignement en 2014. Nous avons encadré un groupe d'étudiants de l'ENSAIA (3ème année de la spécialisation DEFI) avec mon collègue Sylvain Lerch (Agroscope, Suisse) et Paul Montagne (association Floraine) qui ont fait appel à moi pour mes compétences en sciences végétales. La renouée est une plante asiatique, l'une des plus invasives d'Europe. Elle a été introduite en 1840 aux Pays-Bas pour un usage ornementale, mellifère et fourrager (Bailey & Conolly, 2000; Djeddour & Shaw, 2010). Depuis 1950 elle a une dynamique exponentielle en Europe où elle colonise une large gamme d'habitats (Mandák et al., 2004). Différentes caractéristiques favorisent son invasion : un cycle de végétation long de mars à novembre avec une croissance en hauteur jusqu'à 3 mètres, des rhizomes résistants et prospectant jusqu'à 3 mètres de profondeur et une très grande capacité de dispersion via des petits fragments de rhizomes. De plus, elle est très compétitive pour l'Azote et émet des substances allélochimiques pouvant inhiber la germination d'autres plantes. Gérer l'expansion de la Renouée est un enjeu important pour les gestionnaires car elle diminue la biodiversité, provoque des dégâts sur les infrastructures routières et ferroviaires et des effondrements de berges. Les coûts de cette invasion biologique et de la gestion pour la contrôler sont estimés à plusieurs dizaines voire centaines de millions d'euros (e.g. 32 millions d'euros annuels pour 2200 ha en Allemagne, environ 180 millions d'euros de coût annuel global en Angleterre). Les méthodes de lutte peuvent être mécaniques et chimiques mais les coûts de ces traitements sont importants et impactant pour l'environnement. Des méthodes écologiques se développent avec par exemple l'utilisation de fauches mensuelles ou d'éco-pâturage. L'objectif de mes travaux sur la restauration écologique était tout d'abord de déterminer l'effet d'une lutte écologique sur la croissance de la Renouée par l'implantation d'espèces végétales prairiales par des mécanismes de compétition et d'allélochimie. La compétition est une interaction négative et indirecte *via* l'utilisation de ressources communes. L'allélochimie est une interaction directe ou indirecte, positive ou négative, *via* l'émission de métabolites spécialisés. **Mes études ont couplé des approches *in-situ* pour se rapprocher des conditions réelles et *ex-situ* (en phytotron) pour comprendre et analyser les mécanismes impliqués.** Nous avons effectué des analyses de croissance avec des mesures de traits fonctionnels et de dosage de molécules allélochimiques. Ensuite, **j'ai également mené deux études sur les valorisations possibles de la biomasse de la Renouée d'une part et d'espèces prairiales sur friche industrielle d'autre part.** Sur ces deux derniers projets j'ai collaboré avec des laboratoires partenaires de l'ENSAIA (URAFPA et LSE) et également des partenaires locaux (association Floraine, ville de Laxou, Noremat, SNCF réseau Grand Est).

4.3. Effets de la compétition des espèces prairiales sur la croissance de la Renouée du Japon

Mes premiers projets ont commencé en 2015 avec Sylvain Lerch et Paul Montagne. L'objectif était de mettre en place un plan de restauration sur des prairies urbaines à Laxou (proche Nancy) envahies par la Renouée du Japon (*Reynoutria japonica*). **La méthode de lutte écologique sur laquelle j'ai travaillé consiste à affaiblir le couvert végétal envahi par fauche mensuelle pendant au moins trois années puis à installer des espèces prairiales en compétition ensuite en maintenant dans un premier temps les fauches successives.** A Laxou, nous avons mis en place cette méthode et effectué un suivi pendant trois ans ensuite *via* trois stages de M2 que j'ai encadrés. Une étape clé pour réussir ces méthodes de restauration et éviter les risques de modifications irréversibles des écosystèmes est de choisir correctement les espèces végétales à installer en compétition. Mes compétences en écologie des communautés végétales ont été précieuses pour cela. A Laxou, le cahier des charges pour le

choix des espèces et variétés était resserré : adaptées au climat global et local, adaptées au sol, autochtones, compétitives mais pas envahissantes, relativement pérennes, résistantes à la fauche, multi-strates (herbacée, arbuste, arbre) pour occuper différentes niches écologiques, à faible coût d'implantation et de gestion, adaptées au milieu urbain et fréquenté du public (non toxiques et éventuellement esthétiques). En mars 2015, nous avons ainsi mis en place différents couverts végétaux (**Figure 43**) afin de tester des stratégies variées. Nous avons fait un suivi biométrique des renouées avant chaque fauche mensuelle en mesurant leur hauteur, leur densité, leur diamètre et leur surfaces foliaires. Nous avons également fait un suivi botanique mensuel du recouvrement par six quadrat de 0.25 m² sur chaque zone à 5 % près.

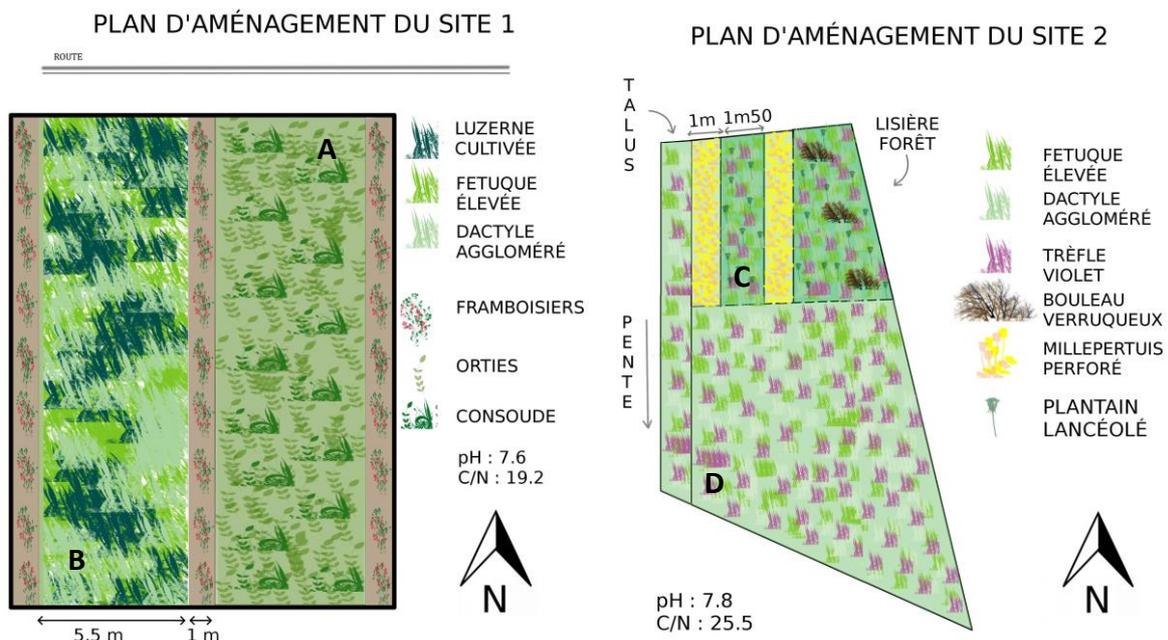


Figure 43. Plan d'aménagement des sites 1 (zones A et B) et 2 (zones C et D) mis en place en 2015 à Laxou pour tester une méthode de lutte contre la Renouée du Japon.

Les résultats des essais de restauration à Laxou par fauche mensuelle et compétition végétale montrent que **la stratégie est efficace pour limiter l'expansion des renouées avec une diminution de l'accroissement journalier en hauteur, du diamètre des tiges et de la densité des tiges sur les quatre zones comparées à une zone témoin uniquement fauchée (Figure 44)**. Ils font également ressortir une différenciation progressive des communautés végétales sur les quatre zones, deux ans après les semis, même si le niveau de biodiversité végétale (richesse spécifique et indice de Shannon) n'augmente pas entre 2015 et 2019. **Les espèces qui s'installent le mieux sont *Symphytum x uplandicum* Bocking 14 (consoude) et *Dactylis glomerata***. Ces résultats montrent que **la complémentarité de niches écologiques par recouvrement végétal serait capable de limiter l'expansion de renouées invasives dans les milieux ouverts**. Ils restent cependant très dépendants du contexte pédo-climatique où se trouve la prairie à restaurer car les sols urbains sont généralement très variables avec souvent des accumulations de remblais de différentes origines. Il est essentiel pour cette méthode d'affaiblir les plantes au préalable et la fauche mensuelle est très efficace pour cela. Ces résultats font l'objet d'une publication qui sera prochainement soumise en collaboration avec Sylvain Lerch mais aussi Christophe Robin et Alan Kergunteuil (LAE).

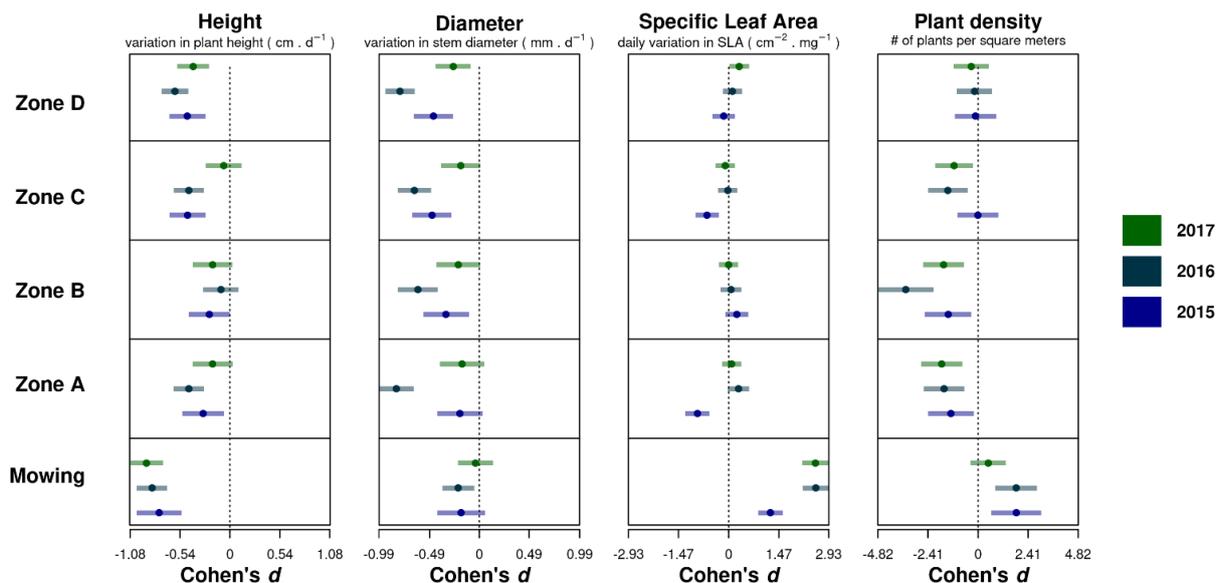


Figure 44. Réponses de l'accroissement journalier en hauteur, en diamètre, de la surface spécifique foliaire et du nombre de plantes par m² pour les zones A, B, C et D et la zone témoin fauchée pour les trois années 2015, 2016 et 2017. Les points indiquent l'effet taille (d Cohen) du traitement fauche et compétition (zones A, B, C et D) comparé au traitement témoin fauché. Les triangles indiquent l'effet taille (d Cohen) du traitement témoin fauché comparé au témoin non fauché. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance à 95 %.

Les résultats concluants de ces essais ont permis d'appliquer la démarche à d'autres sites comme St Nicolas de Port et Vandœuvre-lès-Nancy en Meurthe-et-Moselle. Pour chaque site, il a été nécessaire d'analyser au préalable les variables environnementales (sol, climat) et de définir les objectifs de restauration afin de sélectionner des espèces de Poacées pour le semis prairial les plus adaptées. Nous avons également testé d'autres méthodes de lutte comme l'écopâturage caprin ou le bâchage et constitué un **guide pratique pour une gestion raisonnée des renouées asiatiques** (Collard et al., 2018) ([publication 20](#)). **Un arbre de décision a pu être établi dans notre guide de gestion pratique grâce à l'ensemble des résultats acquis par SPIGEST (Figure 45)**. Cet outil est précieux pour les gestionnaires. C'est un exemple de transfert recherche – gestion réussi. Cette dynamique a débouché sur la création d'une **association SPIGEST (Synergie plantes invasives Grand Est)** dont je fais partie des membres fondateurs avec Norematt, la ville de Vandœuvre, la Ville de Laxou, L'URAFPA, l'ENSAIA et le LAE en 2017. Nous avons également organisé **deux colloques régionaux** en 2015 et 2017 sur la gestion des renouées invasives rassemblant une centaine de participants (<https://spigestinvasives.com>).

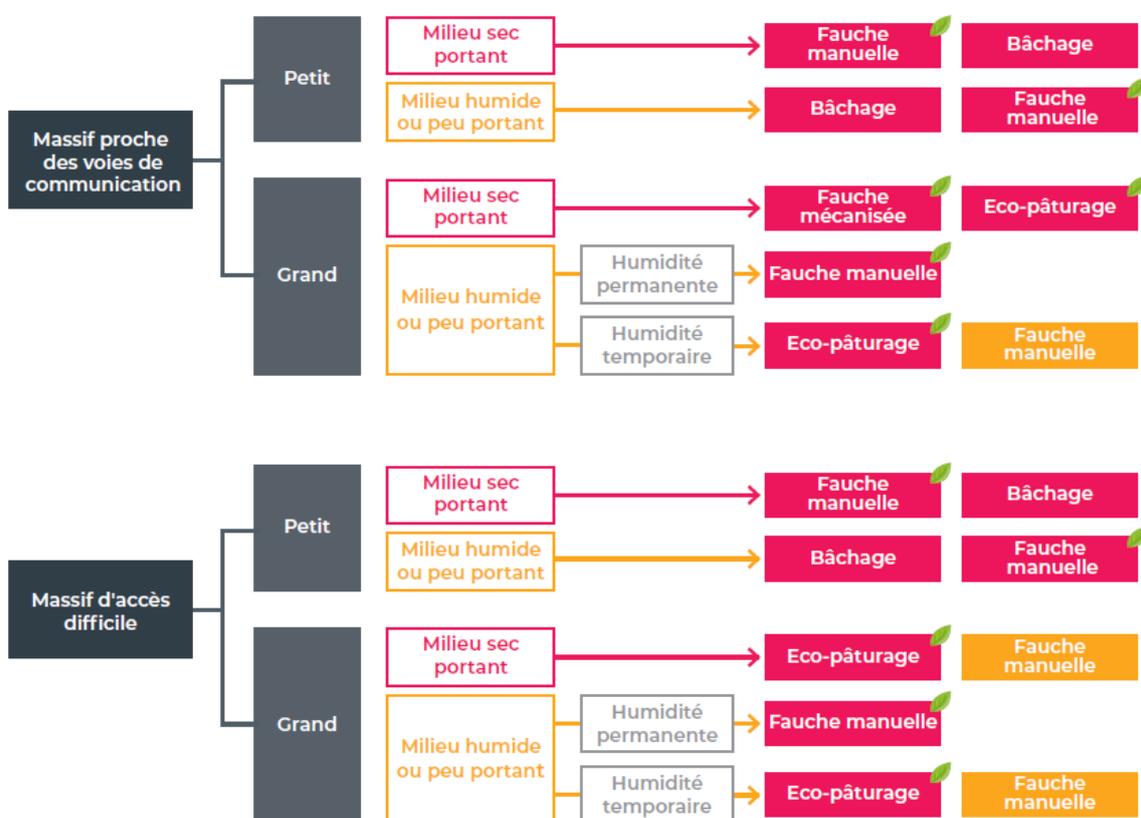


Figure 45. Arbre de décision pour le choix des méthodes de gestion raisonnée des renouées asiatiques. « Plusieurs de ces méthodes peuvent être conjointement utilisées sur un même site en fonction de caractéristiques différentes des massifs de renouée présents sur le site ». Source : Collard et al. (2018).

Pour analyser l'efficacité des différentes méthodes de lutte sur les renouées, j'ai collaboré avec Dominique Gérant (UMR Silva) afin de **quantifier la quantité de réserves carbonées présentes dans les rhizomes de renouées** sur les différents sites. En effet, comme nous l'avons vu dans la thématique 2 sur les essences forestières, la quantité de réserves est un bon indicateur de l'état de vigueur des plantes pérennes. Nous avons co-encadré trois stagiaires en 2017 et 2019 sur ces travaux (deux M1 et une M2).

La comparaison des teneurs en amidon dans les rhizomes de renouée sur des sites en bâchage, fauchage et éco-pâturage met en évidence quelques différences significatives (ANOVA, $p = 0.0016$) (**Figure 46**). Dans l'ordre décroissant, les teneurs moyennes en amidon (\pm écart-type) sont 36 ± 2.4 % MS pour le traitement témoin, 32 ± 2.2 % MS pour le traitement de fauche toutes les 5 semaines (fauche_S5), 24 ± 4.3 % MS pour le traitement de fauche toutes les 10 semaines (fauche_S10) et 20 ± 2.4 % MS pour le traitement avec bâche. Les différences significatives observées entre traitements sont : « témoin » vs « Fauche_S5 » ($p = 0.0301$), « témoin » vs « bâche » ($p = 0.0001$) et « Fauche_S10 » vs « bâche » ($p = 0.0012$).

Le bâchage semble être la méthode d'épuisement des réserves dans les rhizomes la plus efficace mais il appauvrit le sol et impacte donc les capacités de repousse de la végétation

pour la restauration. La fréquence de fauche la plus importante (toutes les cinq semaines) est celle qui épuise le plus les rhizomes. **Cette observation confirme les résultats précédents qui préconisent une fauche mensuelle suivie d'une restauration par compétition végétale après trois ans.** La gestion des renouées par ces différentes méthodes de lutte écologique peut limiter grandement son expansion et sa dominance sur les sites envahis mais elle n'éradique pas totalement les renouées. Il est donc nécessaire de maintenir ces plans de restauration plusieurs années, même si seule une fauche sélective des renouées peut s'avérer efficace une fois que le couvert en compétition est bien installé après quelques années.

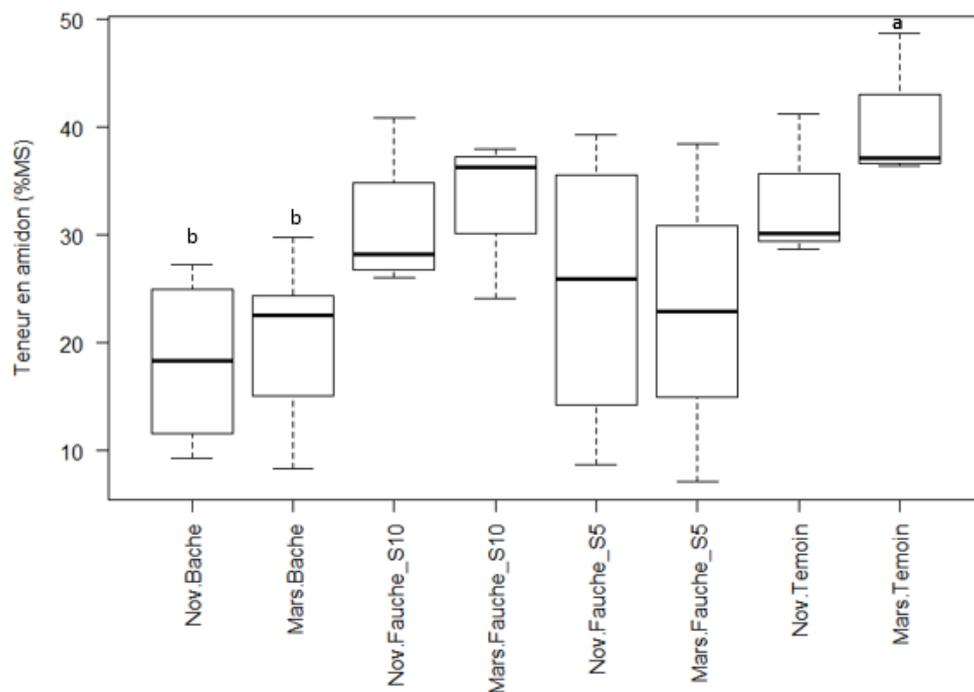


Figure 46. Boîtes à moustache (médiane, 1^{er} et 3^{ème} quartiles) de la teneur en amidon (pourcentage de matière sèche), en fonction des dates (novembre ou mars) en interaction avec le traitement subi (témoin, fauché toutes les 10 semaines (Fauche S10), fauché toutes les 5 semaines (Fauche_S5), bâche) sur le site de Vandoeuvre-lès-Nancy. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les moyennes.

Grâce aux études de restauration écologique réalisées avec le SPIGEST au sein de mon laboratoire, nous avons été contactés par Valentin Morin (SNCF Réseau) en 2019. Ces échanges ont abouti à la rédaction d'un rapport confidentiel d'expertise auquel j'ai participé sur des essais expérimentaux menés dans le cadre d'un protocole de gestion des espèces exotiques envahissantes. Le LAE est également partenaire du projet REEVES (2019-2023, Maîtriser les espèces exotiques végétales envahissantes) coordonné par Valentin Morin avec un budget de plusieurs millions d'euros. Je collabore dans ce projet avec Christophe Robin et Alan Kergunteuil (LAE). Nous avons mis en place une expérimentation en 2021 visant à **analyser les mécanismes de compétition végétale et d'allélochimie de la Renouée du Japon face à des plantes de restauration (*Dactylis glomerata*, *Berberis vulgaris*, *Trifolium pratense*)**. Pour raison de confidentialité, je ne peux pas détailler le dispositif expérimental qui repose sur une analyse de croissance en écophysologie végétale.

Nos premiers résultats montrent que les trois plantes choisies pour la restauration ont un bon potentiel de résistance à la Renouée du Japon. En effet, **la renouée n'a pas d'effet sur le taux de germination du Dactyle et du Trèfle violet et a tendance à augmenter leur croissance probablement via l'émission de composés allélochimiques**. Concernant le potentiel de restauration de ces espèces, les résultats démontrent que l'épine-vinette, probablement grâce à l'émission de composés allélochimiques, diminue significativement le taux de germination, l'accroissement en diamètre et le nombre de feuilles de la renouée. Cependant, cette espèce arbustive testée pour ces propriétés allélochimiques semble peu adaptée pour des restaurations écologiques car il attire des ravageurs et transmet des maladies aux autres végétaux. Le Dactyle présente des résultats similaires à l'épine-vinette excepté sur le taux de germination et réduit également la balance azotée de la renouée indiquant un stress pour la plante invasive. Ces résultats seront approfondis en 2022 sur un autre cortège de plantes de restauration et seront valorisées scientifiquement et par notre partenaire industriel.

4.4. Valorisation de la biomasse fourragère dans les projets de restauration écologique

Les études sur l'éco-pâturage nous ont amenés à nous poser la question de la contamination des fourrages de renouée consommés par les caprins par les polluants présents dans le sol et potentiellement accumulés par la plante. Ce questionnement fait suite à un échange avec Stéphane Bazot (ESE) suite à un jury de soutenances. Nous avons ainsi mis en place une expérimentation en conditions contrôlées avec Catherine Sirguez (LSE), Stefan Jurjanz (URAFPA) et Sylvain Lerch (Agroscope) ayant pour objectifs (1) de **mesurer l'accumulation des éléments traces métalliques** (ETM : Cadmium, Cuivre, Nickel, Zinc) dans les différents organes de la Renouée du Japon sur sol moyennement contaminé et (2) **d'évaluer le risque écotoxicologique lié à la valorisation de la biomasse** par méthanisation, compostage ou pâturage *via* une approche par modélisation.

Les résultats montrent que **les renouées sur sol modérément contaminé après 41 jours de croissance accumulent significativement plus de cadmium, nickel et zinc ($p < 0.01$) dans leurs différents organes que les renouées sur sol témoin (non contaminé) (Figure 47) (publication 21)**. Pour le zinc, la concentration est 7 fois plus importante dans les 3 organes (rhizome, tige et feuille) comparé au témoin, pour le nickel elle est 18 fois plus élevée dans les rhizomes et les tiges et 38 fois plus élevée dans les feuilles, et pour le cadmium, respectivement 15, 36 et 51 fois plus forte dans les rhizomes, tiges et feuilles. Généralement, les feuilles sont les organes qui concentrent le plus ces trois ETM. Les renouées s'acclimatent donc bien à un sol modérément contaminé et sont très compétitives sur ce type de milieux. Les renouées qui poussent sur les sols contaminés ont des concentrations de cadmium proches de la limite maximum européenne autorisée pour les amendements organiques ou l'alimentation animale. Les simulations du modèle montrent que **les concentrations de cadmium dans le foie et les reins dépasseraient la limite réglementaire dans les aliments** lorsque des bovins ou des moutons adultes ingèrent constamment les renouées cultivées sur sol modérément contaminé pendant 200 à 800 jours. Ces résultats mettent en évidence les risques de contamination du fourrage de renouée pour l'alimentation animale. **Ils incitent à évaluer les risques de contamination dans les stations d'éco-pâturage mises en place pour restaurer les zones envahies par la renouée et à adapter les durées de pâturage des renouées.**

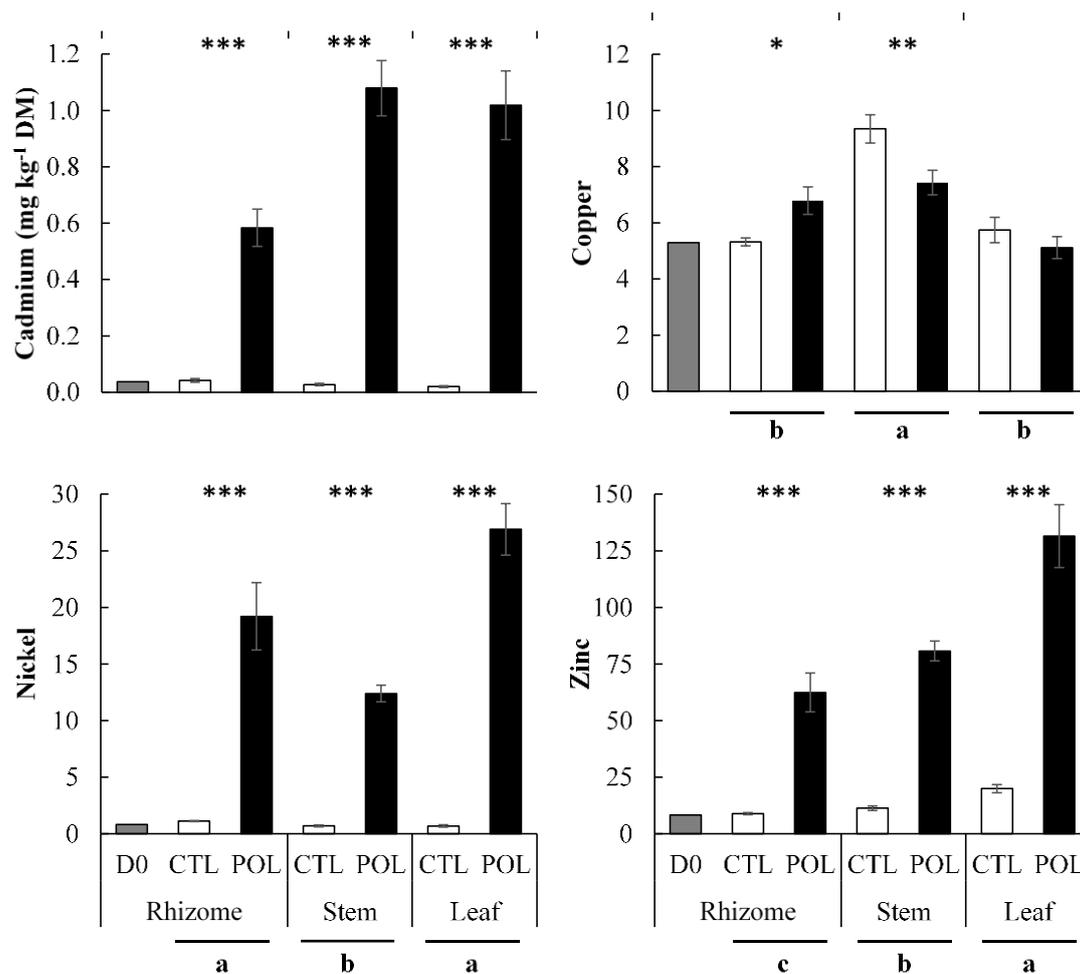


Figure 47. Concentrations de cadmium, cuivre, nickel et zinc (mg kg^{-1} de matière sèche) dans les organes de *Reynoutria japonica* après 41 jours de croissance sur un sol témoin (CTL, barres blanches) ou contaminé par des éléments traces métalliques (POL, barres noires). Les concentrations pour les rhizomes au début de l'expérience sont également indiquées (jour 0 : D0, barres grises). Chaque barre représente les moyennes du traitement avec l'erreur standard de la moyenne comme barre d'erreur. Les niveaux significatifs pour l'effet du sol sur l'organe considéré sont représentés par les symboles *, ** et *** ($P \leq 0,05$, $0,01$ et $0,001$, respectivement). Les niveaux significatifs pour l'effet sur l'organe (moyennes pour la concentration de l'organe regroupées dans tous les sols) à $P \leq 0,05$ sont représentés par des lettres différentes. Source : Lerch et al. 2022.

Enfin, une dernière étude a été réalisée en collaboration avec le LSE (Geoffroy Séré et Apolline Auclerc). Des technosols construits ont été mis en place à Homécourt en Meurthe-et-Moselle pour réhabiliter des anciennes friches industrielles. Ils contiennent trois couches de sols construits en 2007, avec, de la plus profonde à la moins profonde : 100 % de sous-produit papetier, 50 % de terre thermodésorbée et 50 % de sous-produit papetier, 100 % de compost de déchets verts pour une profondeur totale de 1 m. **L'objectif de cette étude était d'évaluer le potentiel de ces technosols construits pour implanter une biomasse fourragère.** Sur ces technosols ont été implantées des espèces prairiales afin de quantifier la biodiversité végétale et animale et la biomasse fourragère produite. Un semis « ancien » a été réalisé en 2007 et était composé de 3 espèces de Poacées (Ray-grass anglais, Fétuque élevé et Dactyle

aggloméré) et 13 espèces de type jachère fleurie de berges et fossés. J'ai proposé ensuite un « nouveau » semis à implanter sur la moitié de la parcelle en 2017 qui était composé de Ray-Grass Hybride, *Festulolium*, Trèfle violet, Vesce commune, Dactyle aggloméré, Fétuque élevée et Trèfle incarnat et adapté aux caractéristiques du sol. J'ai été chargée de mettre en place des suivis de la végétation en 2016 et 2018 puis dans le cadre du stage de M2 Erasmus d'Olbesa Kaci co-encadré en 2019. Les valeurs pastorales ont été estimées grâce à la base de données Eflorasys.

Sur le site d'Homécourt, les technosols implantés sur la friche industrielle montrent que la prairie implantée en 2007 s'est diversifiée entre 2016 (18 espèces) et 2018 (35 espèces) avec une richesse spécifique végétale et un indice de Shannon plus élevés. La proportion de Poacées a diminué, notamment les espèces considérées comme très bonnes fourragères comme le Dactyle, ce qui diminue la valeur pastorale de la prairie en 2018 (29.8) comparée à 2016 (48). Le nouveau semis réalisé en 2017 présente une bonne implantation d'espèces à bonne valeur fourragère comme *Festulolium* ou le trèfle violet ce qui augmente la valeur pastorale de la prairie (43.9). Cependant l'envahissement par *Carduus crispus* (16 % de recouvrement) est problématique pour une valorisation agronomique du fourrage. Concernant la biomasse végétale mesurée fin juin, les niveaux de production pour une fauche tardive sont moyens pour la parcelle anciennement semée en 2018 et assez élevés pour la parcelle nouvellement semée notamment du fait de l'envahissement de *Carduus crispus* (Figure 48). **Ces résultats montrent un potentiel agronomique de ces sols construits pour implanter une biomasse fourragère à condition de diminuer les espèces à faible valeur fourragère comme *Carduus crispus*. Il reste cependant important de quantifier le risque de contamination des fourrages sur ces sols et leur valeur alimentaire pour la santé animale.**

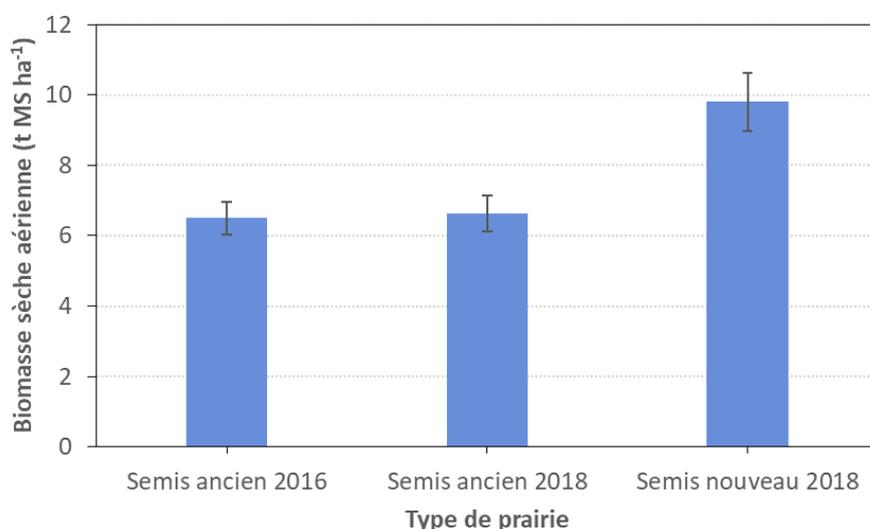


Figure 48. Moyennes de biomasse sèche aérienne mesurée en 2016 et 2018 pour le semis ancien et en 2018 pour le nouveau semis sur le technosol d'Homécourt. Les barres d'erreur représentent l'erreur type autour de la moyenne.

Bilan et perspectives

La mise en place d'un époussemment de trois ans des renouées par fauche mensuelle suivi de l'installation d'un couvert herbacé et du maintien de la fauche mensuelle est efficace pour limiter l'expansion des renouées. Des espèces comme le Dactyle ou la Consoude ont un bon potentiel de compétition avec la renouée du Japon et pourraient limiter son accroissement. Concernant la valorisation de la biomasse dans les zones de restauration, les renouées accumulent des ETM quand les sols sont contaminés ce qui peut présenter un risque pour la santé animale lors du pâturage. Les espèces prairiales semblent bien adaptées au recouvrement des technosols construits pour réhabiliter les friches industrielles mais il est nécessaire de garder des espèces à bonne qualité fourragère et de vérifier le taux d'ETM dans les fourrages en cas de valorisation de la biomasse.

Bien que dépendante du contexte pédo-climatique local, l'utilisation d'espèces prairiales pour la restauration des écosystèmes semble prometteuse sur l'ensemble des sites étudiés. Ces travaux valident les possibilités d'aménagements des pratiques pour conserver la biodiversité et limiter l'expansion des espèces invasives. Ils ont permis des collaborations avec les laboratoires de l'ENSAIA et des partenaires socio-économiques comme la SNCF ou les collectivités territoriales. Ces études étant moins reliées aux thématiques du LAE, il n'a pas été évident de les conduire et surtout de les valoriser par manque de temps. Un objectif pour les mois à venir est de valoriser les résultats acquis sous forme de deux publications scientifiques. **Cette approche appliquée a enrichi mes compétences en aménagement des écosystèmes et ces éléments de connaissance pourraient être appliqués aux agrosystèmes lors de mon projet.**

Publications

20. Collard, J., Mosse, N., Kenens, M., Jurjanz, S., Le Roux, Y., **Michelot-Antalik, A.**, Tehranchi, M., Montagne, P., (2018). Guide pratique pour une gestion raisonnée des renouées asiatiques, 14 p.
21. Lerch, S., Sirguy, C., **Michelot-Antalik, A.**, Jurjanz, S. (2022). Accumulation of metallic trace elements in Reynoutria japonica: a risk assessment for plant biomass valorization. Environmental Science and Pollution Research

V. Projet de recherche

Comprendre et aménager la diversité fonctionnelle florale des agrosystèmes pour conserver les insectes pollinisateurs de la parcelle au territoire

Mon projet de recherche s'inscrit dans la continuité de mes activités les plus récentes tout en intégrant les compétences et réflexions acquises durant ces 15 dernières années depuis mon doctorat. **Il s'appuie sur mes compétences en écophysiologie végétale, en écologie des communautés, en agroécologie et en écologie de la restauration.** Je souhaite développer une recherche qui s'appuie sur l'observation de mécanismes fonctionnels à partir d'expérimentations *in* et *ex situ* et la valorisation de jeux de données acquis à différentes échelles spatio-temporelles. **J'aimerais également renforcer le lien direct entre mes recherches et la gestion des écosystèmes afin de favoriser l'appropriation des concepts d'écologie fonctionnelle par les gestionnaires concernés.** A ce propos, je m'interroge sur le rôle du chercheur dans les enjeux de conservation de la biodiversité, un peu à la manière de certains climatologues qui se questionnent sur l'efficacité de leur mise en alerte sur le changement climatique depuis des décennies. Le déclin de la biodiversité, même si les tendances temporelles et les vitesses d'extinction selon les groupes taxinomiques sont variables, est avéré et constaté depuis de nombreuses années dans les publications scientifiques. La recherche académique documente ce déclin et s'implique également dans des actions de sensibilisation ou participe à des instances qui ont pour objectif de l'enrayer. En France, la création de l'Office Français de la Biodiversité en 2020 ou la mise en place du Plan national en faveur des insectes pollinisateurs et de la pollinisation fin 2021, montrent la volonté d'agir en faveur de la préservation de la biodiversité et l'appropriation de ces enjeux par les politiques publiques. Cependant, ces moyens gouvernementaux doivent être accompagnés d'actions concrètes qui je pense peuvent être impulsées par la recherche et l'enseignement. Ainsi, je souhaite pour les années à venir m'engager personnellement davantage pour la conservation de la biodiversité et l'optimisation de pratiques favorables à celle-ci. Une des actions que je souhaite mener en tant qu'enseignante-chercheuse est le développement de projets de recherche directement en partenariat avec des gestionnaires dans différents milieux n'appartenant pas forcément à des espaces protégés. **Je souhaite m'impliquer davantage dans le transfert de résultats de recherche fondamentale vers des solutions concrètes d'aménagement durable pour la biodiversité et en particulier pour favoriser la survie des insectes pollinisateurs.** Ce modèle taxinomique me semble en effet particulièrement intéressant car c'est un groupe très diversifié, aux comportements divers (approvisionnement en ressources, distances de déplacement, types de nidification...). Il permet de travailler sur des processus d'interactions entre producteurs primaires (les plantes) et consommateurs, il a une grande aire de répartition géographique et contient de nombreuses espèces, est fortement sensible aux impacts anthropiques (notamment aux modifications de pratiques agricoles, au changement climatique et à la composition et configuration des paysages), à un rôle important dans la production agricole et est un vecteur de sensibilisation important auprès du grand public (notamment les abeilles sauvages et domestiques ainsi que les papillons). Mon projet est donc de construire une recherche avec cette visée appliquée de changement de pratiques principalement dans les agrosystèmes mais également en milieu urbain. **Cet investissement nécessite de penser des projets co-construits et appliqués à des zones d'étude de la parcelle au territoire.** Des projets qui soient valorisés scientifiquement avec des résultats publiés dans des revues de rang A mais également

accessibles à plus large échelle (e.g. atlas de biodiversité des collectivités territoriales). Des projets qui aboutissent à des aménagements concrets des écosystèmes en faveur de la biodiversité et dont les résultats accompagnent des changements de pratiques. J'aimerais également que l'ensemble de mes futurs travaux de recherche soit réalisé à partir des résultats obtenus dans des projets de recherche collaborative, avec des collaborations locales au sein du LAE et de l'ENSAIA mais également en grande partie extérieures, d'abord nationales puis internationales. Ces collaborations me semblent essentielles et structurantes pour la suite de ma carrière et elles ont déjà très largement contribuées à mon épanouissement professionnel.

Le bilan de mes activités de recherche autour de quatre thématiques relativement diversifiées me donne pour objectif de **resserrer mes activités de recherche autour de trois grandes questions pour les 5-10 années à venir** :

- 1- Comprendre et quantifier la diversité fonctionnelle florale pour conserver les insectes pollinisateurs ;**
- 2- Favoriser une gestion sans pesticide et résiliente au changement climatique par l'aménagement des écosystèmes ;**
- 3- Evaluer le service de pollinisation de la parcelle au territoire agricole.**

Le positionnement de ce projet au sein du collectif LAE s'inscrit pleinement dans l'axe 2 « Interactions fonctionnelles et valorisation de l'agrosystème au paysage » qui sera mis en place en janvier 2023. Le projet collectif de cet axe implique une dizaine de permanents au LAE. Les deux questions identifiées sont les suivantes :

- 1- Quels sont les effets des facteurs biotiques et abiotiques sur les interactions fonctionnelles plante-plante, plante-insecte, plante- microbiote et les services de régulation (fourniture d'éléments minéraux, pollinisation et contrôle biologique) ?
- 2- Quelles sont les relations entre les déterminants qui permettent de maximiser les synergies entre services et qui permettent de favoriser la production agricole en vue d'une réduction des intrants de synthèse ?

Pour répondre à ces questions, je m'intéresserai plus particulièrement à l'effet de deux facteurs de changement : les pratiques de gestion et le changement climatique sur les interactions fonctionnelles entre plantes et pollinisateurs et au service de pollinisation. Ce choix découle évidemment de mon bilan d'activités de recherche puisque je me suis intéressée à ces thématiques auparavant. Intégrer de plus en plus le changement climatique à mes projets de recherche sur la pollinisation me semble également pertinent vu les enjeux prégnants autour de cette pression anthropique sur l'Homme et les écosystèmes. J'initierai également des travaux sur les relations entre les différents services de régulation et notamment entre la pollinisation et la régulation des ravageurs par conservation *via* l'étude de l'effet de la diversité fonctionnelle végétale sur les insectes.

La place des facteurs de changement : pratiques de gestion et changement climatique dans mon projet de recherche

Lors de la présentation de mes différentes thématiques de projet, l'analyse de l'effet des facteurs de changement : pratiques de gestion et changement climatique ne sera pas toujours détaillée. Cependant, cette analyse sera bien présente tout au long de mon projet. Le terme « comprendre » que j'utilise fait d'ailleurs référence à « comprendre » les effets des facteurs de changements sur la diversité fonctionnelle florale et également « comprendre » les relations entre diversité fonctionnelle florale et diversité des insectes pollinisateurs. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, ces facteurs de changement influencent fortement les interactions entre plantes et pollinisateurs et donc le service de pollinisation. Le changement climatique peut avoir des impacts négatifs sur les pollinisateurs notamment en changeant la phénologie des plantes et des insectes et donc en raccourcissant leurs périodes d'interaction (Hegland et al., 2009) mais également en modifiant la quantité et la qualité des récompenses florales et d'autres traits floraux. Je ne proposerai pas une approche centrée sur l'impact du changement climatique, même si mes connaissances acquises en thèse peuvent être précieuses pour cette question, car ces études demandent l'analyse de jeu de données interannuelles sur le long terme ou l'utilisation de la modélisation ou l'utilisation de plateformes expérimentales spécifiques qui simulent les scénarios de réchauffement. Cependant, mon objectif est bien que mes recherches aillent vers une gestion optimale des écosystèmes incluant évidemment leur résilience au changement climatique et un changement des pratiques agricoles.

1. Comprendre et quantifier la diversité fonctionnelle florale pour conserver les insectes pollinisateurs

1.1. Quantifier la diversité fonctionnelle florale des espèces végétales

Contexte

L'écologie des traits fonctionnels s'est majoritairement développée à partir de mesures sur les individus qui sont regroupées par espèce dans les bases de données (Cornelissen et al., 2003; Kattge et al., 2011). Les traits les plus étudiés sont ceux proposés par Westoby (1998) : la SLA, la hauteur des plantes et la masse de la graine qui les décrit comme trois axes de variation des plantes liés respectivement à leur gestion des ressources, à leur aptitude à la compétition et à leur capacité de régénération. Ces dernières années, cette approche a été étendue à d'autres structures végétales comme le bois (Chave et al., 2009) ou d'autres groupes taxinomiques comme les invertébrés terrestres (Moretti et al., 2017). **Actuellement, un constat majeur est le manque de mesures de traits floraux dans les bases de données de traits fonctionnels** (E-Vojtkó et al., 2020). **Pourtant, ces traits décrivent les organes et les structures reliés à la reproduction des plantes et peuvent donc jouer un rôle important dans leur conservation.** Ils structurent également les interactions entre plantes et pollinisateurs et peuvent être regroupés en traits phénologiques, signaux, traits d'accessibilité ou récompenses comme nous l'avons vu précédemment (**Figure 23**). Les plantes entomophiles maximisent leur reproduction en augmentant la longévité de leurs fleurs, en produisant des fleurs accessibles aux pollinisateurs ou en augmentant leur biomasse florale (E-Vojtkó et al. 2020). Certains traits floraux ont été peu quantifiés car ils sont difficiles à mesurer et ont une

grande variation de réponse à leur environnement. Il s'agit notamment des traits de récompense comme la quantité et la qualité des nectars et du pollen (Junker & Parachnowitsch, 2015). **Il semble essentiel d'avoir une base de données avec l'ensemble des traits floraux pour chaque espèce car c'est cette vision holistique des fleurs que les pollinisateurs perçoivent.** Ainsi, Roddy et al. (2021) proposent d'établir un syndrome économique floral (en référence au syndrome économique foliaire décrit en 2004 par Wright et al. pour identifier les compromis et les axes de variation entre les traits floraux. Ce syndrome est relié aux contraintes évolutives des plantes qui doivent assurer leur reproduction tout en limitant leurs coûts en carbone. Ils proposent de mesurer trois traits en particulier : la longévité d'une fleur, l'aire florale et la surface spécifique florale (ratio du poids sec floral sur la surface projetée de la fleur) et de standardiser les protocoles de mesures des traits floraux.

Démarche scientifique

Depuis plusieurs mois, nous travaillons sur la rédaction d'un protocole de mesures standardisées des traits floraux pour les pollinisateurs. **L'objectif est de rassembler tous les protocoles existants sur les mesures de traits floraux et de publier un manuel scientifique** en s'inspirant du modèle réalisé pour les traits fonctionnels des plantes (Cornelissen et al. 2003; actualisé par Pérez-Harguindeguy et al. 2013). Ce travail est coordonné par Mathilde Baude (IEES) et moi-même. Nous avons recensé 23 traits floraux actuellement décrits (dont la moitié sont des traits de récompenses). Il s'inscrit dans une logique d'écologie comparative c'est-à-dire principalement basée sur le regroupement de plusieurs traits pour un grand nombre d'espèces dans des matrices espèces x traits (Garnier & Navas 2013). Les rubriques abordées pour chaque trait sont (1) une introduction du trait : sa définition et à quoi il peut être relié en termes de facteurs écologiques et de biens et services écosystémiques ; (2) comment collecter l'échantillon végétal (3) comment stocker les échantillons (4) comment faire la mesure (5) les précautions particulières et (6) les références qui y sont liées. Nous ajouterons également des informations sur les unités à utiliser, le nombre d'individus minimum à échantillonner et les rangs de valeurs observées sur la base de données. La prochaine étape est de contacter différents scientifiques internationaux pour harmoniser notre manuel et avoir une vision la plus commune possible de nos protocoles.

Outre la valorisation évidente de ces protocoles sous forme de publications scientifiques avec les compétences de nombreux collègues de France et de Belgique et d'autres pays en élargissant le consortium, je souhaite continuer de mesurer les valeurs des différents traits floraux par individu et de les moyennier par espèce pour enrichir nos bases de données. Pour avancer sur cet objectif, nous avons formé un groupe de travail au sein du GDR Pollineco coordonné par Mathilde Baude (IEES) et Anne-Laure Jacquemard (UC Louvain). A ce jour, nous avons rassemblé des valeurs de traits floraux pour une centaine d'espèces dans une base de données. **L'objectif est d'avoir une base de données pour un plus grand nombre d'espèces végétales de différents habitats pour chaque trait floral.** Pour cela, nous pourrions tout d'abord nous appuyer sur un projet en cours de valorisation (Polliflor, 2020-2021) que je coordonne en collaboration avec Anne Bonis (GEOLAB), Servane Lemauviel-Lavenant (EVA) et Olivier Chabrierie (EDYSAN). Ce projet a permis d'acquérir des données de hauteur florale, d'aire florale, de quantité de nectars et de quantité de pollens sur **115 espèces végétales différentes** dans 36 prairies de différents habitats en France : prairies mésophiles en Lorraine,

prairies de marais dans le Cotentin, prairies calcicoles dans la Somme et prairies de montagne dans la Chaîne des Puys. Les mesures ont été effectuées en 2020 sur une partie des placettes suivies pour le projet SURPAS présenté précédemment (**Figure 8**). Ensuite, je participe depuis fin 2020 au projet Flores (Weed FLOral RESource potential in Mediterranean vineyards and olive groves) coordonné par Karim Barkaoui (ABSys). Réalisées *ex situ*, les expérimentations ont permis de quantifier les traits floraux de 20 espèces végétales présentes dans les vignobles et oliveraies méditerranéennes. **Les plantes étudiées sont des adventices (qui sont parfois également des plantes prairiales) qui peuvent jouer un rôle important pour l'attractivité des pollinisateurs dans les agrosystèmes via leurs ressources florales.** Plus d'une dizaine de traits floraux par espèce ont été mesurés (phénologiques, signaux, traits d'accessibilité et récompenses). Les résultats sont en cours d'analyse dans le cadre de la thèse de Léa Genty (étudiante que j'ai co-encadrée en stage de M2 avec Alan Kergunteuil et Christophe Robin).

Ces travaux doivent être poursuivis d'une part en mesurant davantage de valeurs de traits liés à la **nutrition des pollinisateurs** comme la qualité des pollens qui semble jouer un rôle prépondérant dans la santé des abeilles sauvages (Filipiak, 2019). D'autre part, en utilisant les principes de **science ouverte** pour que les données soient accessibles au plus grand nombre.

1.2. Analyse des relations entre diversité florale et diversité des pollinisateurs à l'échelle des communautés

Contexte

Traditionnellement, l'écologie de la pollinisation s'est principalement intéressée aux processus co-évolutifs sur une seule espèce ou un seul genre et beaucoup moins d'études se sont placées à l'échelle des communautés (E-Vojtkó et al., 2020). Cependant, **ces dernières années ces approches à l'échelle des communautés se sont multipliées.** La diversité de ces approches est décrite dans la synthèse bibliographique de E-Vojtkó et al. (2020) dont j'ai repris le schéma en **Figure 49**.

Community scale studies

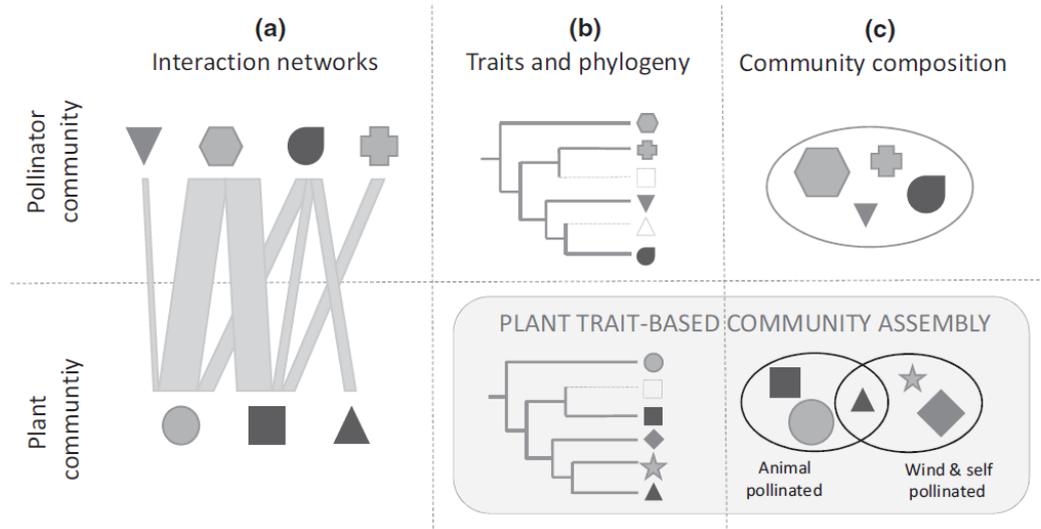


Figure 49. Schéma des approches les plus utilisées pour étudier les communautés de plantes et de pollinisateurs. (a) Les réseaux plantes-pollinisateurs, (b) les distances phylogénétiques des traits floraux, (c) les règles d'assemblage des espèces (basées sur l'abondance ou la fréquence), et la combinaison de ces approches : (ab) l'interaction des traits entre les plantes et les pollinisateurs et le test des syndromes de pollinisation, (ac) les réseaux plantes-pollinisateurs dans les communautés végétales prenant en compte l'abondance et la co-occurrence des espèces, (bc) les patrons de coexistence des espèces déterminés par les traits floraux et/ou les relations phylogénétiques (zone grisée sur le schéma), (abc) l'assemblage de communautés basé sur les traits fonctionnels et piloté par les interactions trophiques. Les symboles représentent différentes valeurs de traits fonctionnels et leurs tailles sont proportionnelles aux abondances des espèces. Dans la section (b), les symboles vides avec des branches en pointillés représentent des espèces présentes dans le pool d'espèces de l'habitat mais absentes des communautés locales. Ainsi, les approches de la section (b) travaillent généralement sur le pool d'espèces de l'habitat plutôt qu'au niveau de la parcelle. Source : (E-Vojtkó et al. 2020).

Une première façon d'intégrer l'approche par trait fonctionnel à l'étude des interactions plantes-pollinisateurs est de construire une méthodologie par réseau d'interactions. Dans les réseaux bipartites, l'idée est de tester le niveau de spécialisation de chaque taxon de pollinisateur pour un ensemble de traits floraux et de voir à quel point cette spécialisation contribue à la structure des communautés plantes-pollinisateurs. Cette méthode a été testée par Junker et al. (2013) qui ont mesuré 10 traits floraux différents pour chacune des 53 espèces végétales de leur réseau plantes-pollinisateurs constitué de 2549 interactions. Pour l'étude, les préférences de 31 taxons de pollinisateurs pour ces traits floraux ont été analysées. **Les résultats montrent que des relations fortes et significatives sont établies entre la diversité fonctionnelle des valeurs de traits floraux et la diversité des visites d'insectes.** La phénologie, la hauteur des fleurs, la réflectance florale et la profondeur des tubes à nectar sont les traits qui influencent le plus les visites d'insectes. La quantité de récompenses florales (nectar et pollen) influence moins le nombre de visites des taxons de pollinisateurs mais elle

n'a été mesurée que sur la moitié des espèces végétales, du fait de la difficulté de mesure, ce qui est limitant dans l'analyse.

Une deuxième approche pour étudier l'influence des traits floraux sur la diversité des pollinisateurs est d'agréger ces traits à l'échelle des communautés. Comme nous l'avons vu, des indices de diversité fonctionnelle florale peuvent être calculés à l'échelle des communautés végétales. Les relations entre ces indices et la diversité des pollinisateurs peuvent valider l'hypothèse de mass-ratio (indice CWM) ou celles de complémentarité de niches (indice FD) (**Figure 37**). Ces relations et leurs déterminismes restent largement à explorer et à comprendre. En effet, peu d'études ont été consacrées à cette question et les hypothèses et résultats sont contrastés. Une hypothèse de Fornoff et al. (2017) est que **la CWM des signaux visuels (hauteur florale, aire florale et couleur jaune) augmenterait la richesse et l'abondance des pollinisateurs (Figure 50)**. Ce processus s'expliquerait par une plus grande attractivité dans les communautés ayant des grosses aires florales, des hauteurs importantes et une couleur jaune. Cette hypothèse a souvent été vérifiée dans la littérature. L'autre hypothèse forte de Fornoff et al. (2017) est qu'**une augmentation de la diversité fonctionnelle florale des traits entraînerait une augmentation de la richesse spécifique des pollinisateurs par complémentarité des niches écologiques mais diminuerait l'abondance des pollinisateurs**. Ce dernier mécanisme s'expliquerait par des signaux trop divers dans la communauté florale qui pourraient diminuer la constance de visites des pollinisateurs et donc la fréquence de leurs visites.

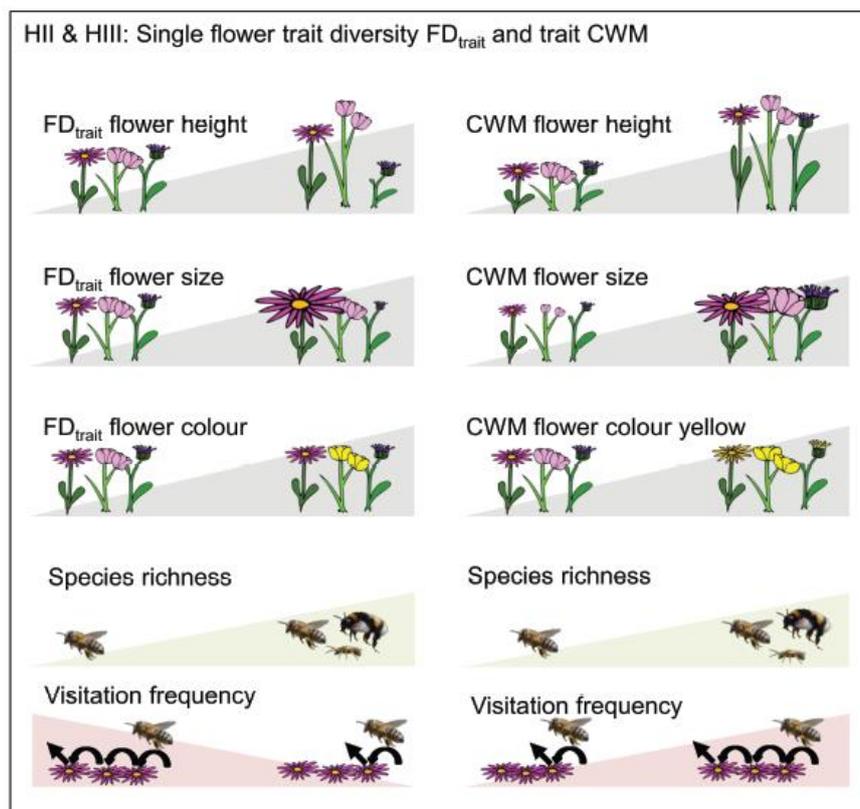


Figure 50. Schéma des hypothèses de relations entre la diversité fonctionnelle (FD) et la CWM pour trois traits floraux et la richesse spécifique et la fréquence de pollinisateurs à l'échelle des communautés. Source : Fornoff et al. (2017).

Concernant l'hypothèse de mass-ratio, Fornoff et al. (2017) mettent en évidence que la richesse spécifique des pollinisateurs est influencée positivement par la CWM de la hauteur florale et négativement par la quantité d'acides aminés dans les nectars et que la fréquence d'interactions (i.e. abondance) des pollinisateurs est influencée positivement par la CWM de la hauteur florale et la CWM de la quantité de sucres dans les nectars et négativement par la CWM de la quantité d'acides aminés dans les nectars. Uyttenbroeck et al. (2017) montrent que le taux de visites des pollinisateurs (i.e. abondance) est corrélé positivement au pourcentage de recouvrement des fleurs blanches et de plantes au nectar non accessible et négativement à la CWM de la date de début de floraison. Nos résultats quant à eux ne montrent aucun effet de la CWM de chaque trait floral sur la fréquence d'interactions des pollinisateurs (Goulnik, Plantureux, They, et al., 2020). **Concernant l'hypothèse de complémentarité de niches**, Fornoff et al. (2017) et Uyttenbroeck et al. (2017) ont trouvé des relations négatives entre la diversité fonctionnelle des traits floraux et l'abondance des pollinisateurs alors que nous trouvons une relation positive entre ces deux variables (Goulnik, Plantureux, They, et al., 2020). **Selon Schleuning et al. (2015), une relation positive est plutôt attendue car, d'après le cadre conceptuel des relations entre biodiversité et fonctionnement (testées pendant des décennies en écologie des communautés), une augmentation de la diversité fonctionnelle florale peut entraîner une augmentation des niches écologiques et donc une augmentation de la fréquence de visites des pollinisateurs.** A la différence de notre étude, les expérimentations suivies par Fornoff et al. (2017) et Uyttenbroeck et al. (2017) se déroulent sur des sites d'assemblages d'espèces végétales dans des micro-parcelles avec beaucoup de pollinisateurs généralistes comme ils le soulignent. Cette relation dépendrait donc des habitats, des pools locaux de plantes et pollinisateurs ainsi que de l'échelle spatio-temporelle considérée. Klaus et al. 2021 ont de plus récemment démontré que la diversité fonctionnelle florale (plus que l'abondance florale) était un élément essentiel pour la santé des pollinisateurs. En effet, dans leur étude en mésocosmes, ils montrent que c'est la diversité des ressources florales et pas seulement leur abondance qui améliore la reproduction d'une abeille sauvage solitaire (*Osmia bicornis*) et sa résistance aux néonicotinoïdes. **La diversité fonctionnelle florale des communautés, et notamment celle des ressources florales et de leur qualité, semble donc jouer un rôle essentiel pour la conservation des pollinisateurs qu'il faut davantage comprendre et étudier dans les écosystèmes.**

Démarche scientifique

L'abondance des insectes pollinisateurs semble répondre relativement bien à l'hypothèse de mass-ratio concernant les communautés florales avec un trait comme la quantité de sucres dans les fleurs qui apparaît important. Les études des relations entre diversité florale et diversité des insectes pollinisateurs restent cependant rares et les résultats sont contrastés. **Mon projet est de continuer à travailler sur cette question sur les agrosystèmes prairiaux, en y intégrant éventuellement l'étude des infrastructures agroécologiques comme les bandes fleuries ou les haies qui jouent un rôle important dans la fourniture de ressources pour les pollinisateurs en paysage agricole.** Cette approche nécessite une analyse statistique des jeux de données expérimentaux et notamment des données sur la biodiversité de l'ensemble des taxons d'insectes pollinisateurs (pas seulement les abeilles sauvages). Cette biodiversité pourra être étudiée taxinomiquement mais également de façon fonctionnelle en mesurant des traits sur les insectes comme la pilosité ou la masse (mesurées et évoquées dans le bilan des activités) sur les collections de pollinisateurs issues de mes projets (près de 15 000

individus). **Ces liens s'ils sont bien établis fourniront une compréhension plus mécaniste de l'interaction plante-pollinisateur et un proxy plus direct du service de pollinisation.** Pour cela, je pourrai m'appuyer sur les résultats du projet Polliflor en cours de valorisation. En plus des traits floraux mesurés sur 115 espèces végétales différentes, nous avons échantillonné des insectes pollinisateurs pendant deux sessions sur chaque placette avec une méthode active de capture au filet et une méthode passive par coupelles colorées. Nous avons testé l'effet de la CWM et du FD des traits floraux sur la fréquence d'interactions plantes-pollinisateurs ($n = 2570$ insectes capturés au filet comprenant 265 espèces différentes) de chaque placette ($n = 36$) pour chaque session. **Les premiers résultats montrent que la quantité de sucres dans les nectars, la CWM de la hauteur florale et le nombre d'espèces fleuries influencent positivement la fréquence d'interactions des pollinisateurs (modèle mixte linéaire généralisé, $R^2_m = 0.63$, $p < 0.05$).** Ces premiers résultats montrent l'influence des traits floraux sur la fréquence de visites des pollinisateurs dans plusieurs habitats (4 régions et 12 unités de végétation différentes) et une possible généralité de ces relations.

Lorsque les bases de données de traits floraux seront plus complètes pour chaque espèce végétale, il sera possible d'utiliser les bases de relevés botaniques pour calculer des CWM et des indices de diversité fonctionnelle florale des communautés. Par exemple, l'utilisation d'Eflorasys pourrait s'avérer pertinente avec cet objectif. **Ainsi, en utilisant les relations entre la diversité fonctionnelle florale et l'abondance et la diversité des pollinisateurs, nous pourrions identifier les habitats prairiaux les plus susceptibles de conserver la biodiversité des pollinisateurs.**

2. Favoriser une gestion sans pesticide et résiliente au changement climatique par l'aménagement des écosystèmes

2.1. Appliquer les observations fonctionnelles à la gestion et à la restauration des prairies

Contexte

Pour faire face au déclin de la biodiversité et au changement climatique, les paysages agricoles doivent être aménagés différemment. Parmi les aménagements qui pourraient être favorables à la conservation de la biodiversité tout en maintenant la production agricole, Tschardt et al. (2021) proposent de **diversifier les cultures et modes d'occupation des sols, de diminuer la taille des parcelles et d'augmenter la proportion d'habitats semi-naturels.** Par exemple, le déclin des insectes dans les prairies allemandes (67 % en biomasse et 34 % des espèces entre 2008 et 2017) a été majoritairement observé dans des paysages simplifiés dominés par des cultures annuelles (Seibold et al., 2019). De plus, une analyse multi-taxons (plantes, papillons, abeilles, sauterelles, syrphes, araignées, punaises, scarabées et cicadelles) réalisée en Allemagne montre une perte de 29 % de la richesse spécifique des prairies calcaires lorsque le pourcentage de cultures annuelles dans le paysage environnant passe de 10 à 80 %. Brühl et al. (2022) ajoutent la nécessité de **diminuer les pesticides** et notamment ceux de synthèse qui s'avèrent à risques pour l'Homme et la biodiversité. Marrec et al. (2022) précisent également qu'il faut intégrer à ces changements une **diminution de l'intensité des pratiques agricoles à l'échelle paysagère.** Dans ces futures préconisations d'aménagement, le rôle des prairies permanentes semble central. En effet, elles représentent une grande partie

des habitats semi-naturels en termes de surface et un tiers la SAU européenne (Huyghe et al., 2014). Elles sont généralement moins ou pas traitées en pesticides comparées aux autres cultures. Ce sont des habitats favorables à la biodiversité de la faune et de la flore (Habel et al., 2013) et elles constituent des ressources florales pour les pollinisateurs tout au long de l'année dans les paysages agricoles. Par exemple, les prairies calcaires sont des habitats majeurs pour les abeilles sauvages (Klaus et al., 2021; Steffan-Dewenter & Tschardt, 1999). Une augmentation de la richesse spécifique des plantes prairiales peut augmenter la diversité des pollinisateurs et la pollinisation des cultures adjacentes (Orford et al., 2016; Woodcock et al., 2013). En retour des pollinisateurs divers (Fontaine et al., 2005; Fründ et al., 2013) ou abondants (Lundgren et al., 2016) peuvent maintenir la diversité des plantes prairiales. Ces prairies permanentes seraient également plus résilientes au changement climatique de par leur diversité d'espèces comparativement à d'autres cultures (relation positive entre diversité et résilience largement éprouvée en écologie). Pour toutes ces raisons et parce qu'elles sont au cœur de la transition agroécologique, qu'elles fournissent un large ensemble de services écosystémiques, qu'elles constituent un modèle de choix pour étudier la diversité végétale et qu'elles ont très largement contribué aux connaissances en écologie des communautés, **je souhaite inscrire une partie de mon projet sur les aménagements d'agrosystèmes dans la gestion et la restauration des prairies permanentes.** Les prairies permanentes ont perdu 10 millions d'hectares sur les cinquante dernières années en Europe (Huyghe et al., 2014). Comme évoqué précédemment, ce déclin est dû à l'abandon des surfaces et à l'intensification agricole. Pour mieux gérer les prairies et les préserver dans les paysages agricoles, il est nécessaire d'évaluer les bien et les services qu'elles peuvent fournir et de mettre en évidence les avantages socio-économiques qui en découlent. Nos travaux récents sur l'évaluation multi-services des prairies ont ces objectifs. Concernant la pollinisation, actuellement les indicateurs de valeur pollinisatrice des prairies sont principalement basés sur une approche taxinomique. Cette approche vise à recenser les espèces mellifères (i.e. attractives pour les abeilles domestiques) dans le cortège d'espèces fleuries. Pour une gestion multi-services des prairies il semble essentiel d'élaborer d'autres indicateurs basés sur les relations fonctionnelles entre plantes et pollinisateurs. D'autre part, pour préserver la richesse des prairies permanentes, des techniques de restauration sont à l'œuvre depuis plusieurs années et se développent. Elles consistent à prélever du foin ou récolter des graines de prairies riches en biodiversité végétale afin de les déposer sur des prairies en mauvais état de conservation. Ces techniques innovantes pourraient permettre de réimplanter des communautés prairiales diversifiées dans les paysages agricoles.

Démarche scientifique

Dans un premier temps, **ma démarche consistera à élaborer un indicateur fonctionnel de la fréquence de visites des pollinisateurs en prairie.** Cet indicateur devra déterminer la valeur pollinisatrice des communautés prairiales et faciliter la gestion des prairies pour favoriser la conservation des pollinisateurs. **L'idée principale de cette approche est de créer une classification basée sur les traits floraux afin de rendre opérationnelle l'utilisation de l'écologie fonctionnelle pour la gestion des prairies.** Pour cela, je renforcerai mes collaborations avec l'équipe Agisem de Colmar (LAE) spécialisée dans l'évaluation multi-critères et la construction d'indicateurs agri-environnementaux (en particulier Christian Bockstaller, Jean Villerd et Chantal Rabolin). Une amélioration de l'indicateur de Ricou et al. (2014) est déjà une première possibilité envisageable à court terme. Cet indicateur permet

d'établir des notes de valeur pollinisatrice de chaque espèce végétale à partir des traits floraux. Il a été validé par des observations de morphotypes de pollinisateurs (abeilles, bourdons et syrphes) sur 29 espèces végétales de bandes fleuries ou de bordures de champs. Il est construit à partir de trois catégories de traits floraux : attractivité (aire florale, couleur de la fleur, réflexion des ultra-violet), accessibilité (famille botanique, symétrie de la fleur, forme de la corolle) et récompense (présence de nectar, quantité de pollen, composition en sucres du nectar, qualité du pollen) selon le schéma en **Figure 51**.

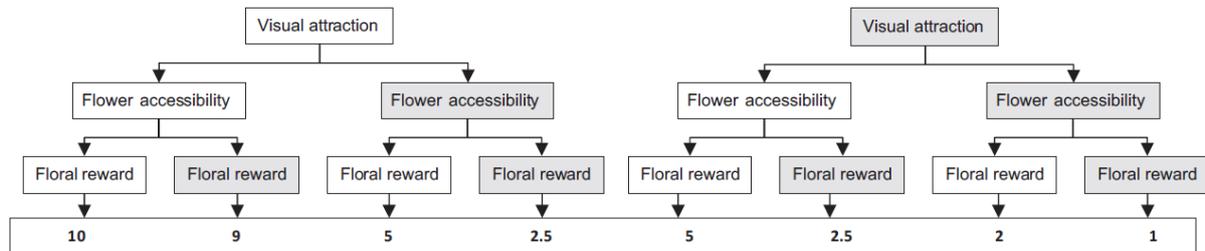


Figure 51. Structure de l'arbre de décision de la valeur pollinisatrice finale de chaque espèce végétale à partir des notes d'attractivité, d'accessibilité et de récompense. Source : Ricou et al. (2014)

Grâce à notre base de données de traits floraux quantitatifs, nous pouvons tout d'abord compléter les valeurs de traits qui ne sont pas des variables continues (exemple quantité de nectar ou de pollen), ajouter d'autres traits à prendre en compte (la profondeur des tubes à nectar pour l'accessibilité par exemple). Ensuite, nous pouvons utiliser les relations expérimentales observées entre valeurs des traits floraux et visites de pollinisateurs à l'espèce (ou au morphotype) pour améliorer la prédiction de valeur pollinisatrice selon les insectes car elle n'est actuellement pas très différente selon les morphotypes. Cette démarche mobilisera notamment nos données de réseaux plantes-pollinisateurs constituées lors des différents projets que j'ai coordonnés (thèse de Jérémie Goulnik, Polliflor, projet Grand Nancy terre de pollinisateurs) et des données issues de la littérature. Ce travail pourra donc se faire en particulier sur les plantes prairiales (mais également sur les adventices avec les partenaires du projet Flores).

Grâce aux valeurs de traits floraux par espèce, nous pourrions développer la base de données eFLORAsys. En effet, cette base contient déjà en grande partie les valeurs de traits fonctionnels végétatifs des espèces prairiales. L'idée sera de rentrer les données de traits floraux par espèce puis de renseigner les valeurs de l'indicateur de pollinisation nouvellement créé dans la base afin de disposer d'un outil puissant pour évaluer les valeurs pollinisatrices des relevés botaniques réalisés depuis les années 1980 à l'échelle française (8408 relevés dans la base). Ces perspectives pourraient permettre d'étudier l'évolution des valeurs pollinisatrices des prairies sur les 40 dernières années. Nous appliquerons en particulier ce calcul aux prairies de la typologie nationale des prairies permanentes, qui a été développée avec l'Institut de l'Élevage, 27 chambres d'agriculture et des laboratoires de l'INRA. Nous nous appuierons enfin sur cet indicateur pour améliorer l'évaluation de la pollinisation dans les grilles des jurys du concours général agricole des prairies fleuries. Cette approche fonctionnelle pourra également améliorer les plans de gestion des prairies, comme celles gérées par le CEN (Conservatoire d'espaces naturels) Lorraine avec qui nous travaillons régulièrement et qui sont intéressés par nos travaux.

Les données fonctionnelles sur les espèces végétales en termes d'intérêt pour les insectes pollinisateurs pourront être également utilisées dans le futur pour les pratiques de restauration des prairies permanentes. La démarche serait d'identifier les communautés prairiales favorables à la conservation des pollinisateurs et de les utiliser pour restaurer des prairies dégradées. Comme toute démarche de restauration, cette méthode nécessitera de limiter les prélèvements sur les prairies d'intérêt pour ne pas les surexploiter et de s'assurer d'une implantation pérenne (c'est-à-dire adaptée aux facteurs pédo-climatiques et aux pratiques de gestion) des espèces prairiales installées. Une étape importante dans ces stratégies de restauration et d'évaluation de la valeur pollinisatrice des prairies est d'intégrer une dimension multi-services. En effet, les prairies permanentes sont utilisées pour la production de fourrage de qualité, de stockage de carbone et d'autres services qu'il est nécessaire de maintenir (en plus de la pollinisation). Par conséquent, des liens seront faits avec le développement d'indicateurs de ces différents services que nous élaborons actuellement dans le projet Surpas (coordonné par Anne Bonis, GEOLAB). De plus, **je souhaite continuer les collaborations avec le réseau de chercheurs qui évalue les liens pratiques agricoles, diversité végétale et services écosystémiques à l'échelle nationale sur les prairies permanentes.**

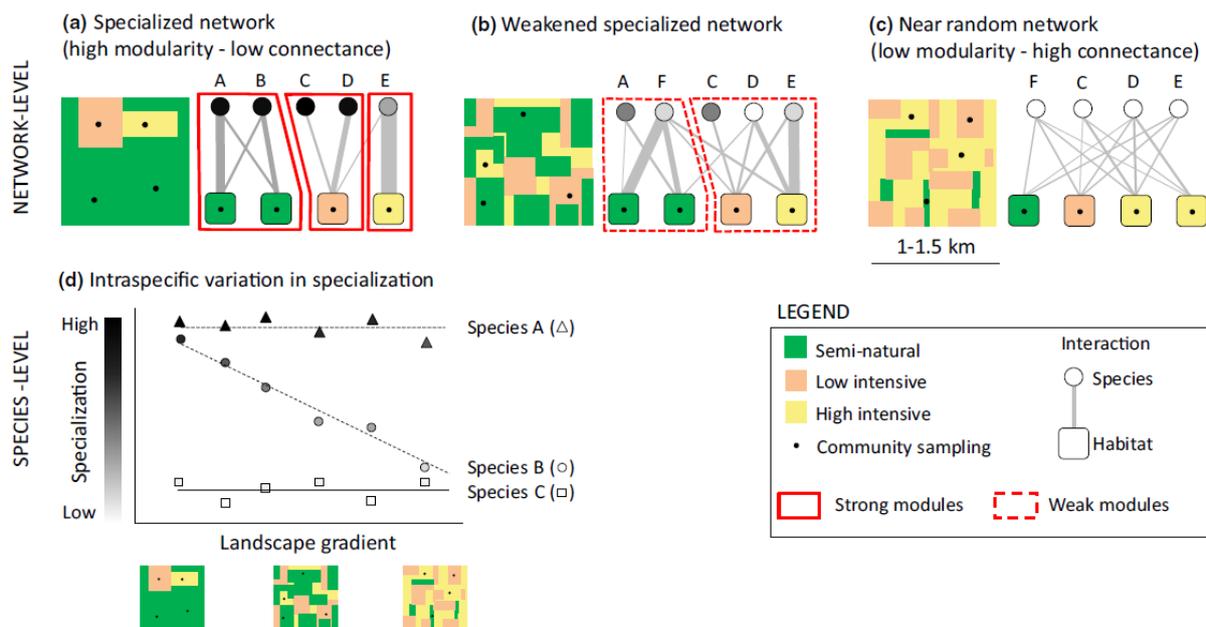
2.2. Aménager les agrosystèmes pour conserver les insectes pollinisateurs

Contexte

Aménager les agrosystèmes pour conserver les pollinisateurs ne repose pas seulement sur la préservation de surfaces prairiales aux multiples fonctions. **Comme nous l'avons évoqué, il s'agit de développer des paysages agricoles diversifier en termes de sites de nidification pour les pollinisateurs et de ressources fleuries continues, spatialement et temporellement.** La plupart des abeilles sauvages sont terricoles et ont besoin de zones de sol nu mais certaines peuvent aussi nidifier dans les tiges creuses ou même dans les coquilles d'escargot (Vereecken, 2017). Les papillons ont généralement besoin de plantes hôtes. Les diptères et les coléoptères pondent dans des endroits variés : terre, plantes, eau...

Les ressources florales doivent être aménagées fonctionnellement à l'échelle des communautés et des paysages. A l'échelle des communautés d'abord il s'agit d'avoir une vision mécaniste des plantes qui seront les plus fonctionnelles pour les pollinisateurs c'est-à-dire, attractives, accessibles et nutritives. Pour cela, les connaissances des relations entre traits floraux et visites de pollinisateurs sont essentielles et doivent être remobilisées. **A l'échelle du paysage une question semble émergente : les pollinisateurs sont-ils capables de s'acclimater rapidement au changement de structure et de disponibilité des ressources florales ? Pour répondre à cette question et imbriquer les connaissances de l'écologie des réseaux d'interaction et l'aménagement des paysages agricoles, l'approche développée par Marini et al. (2019) me semble très pertinente.** Comme nous l'avons évoqué précédemment, les pollinisateurs peuvent être spécialistes ou généralistes. Si la composition et la configuration du paysage change, les pollinisateurs gardent-ils le même niveau de spécialisation pour les ressources ? Deux hypothèses peuvent être émises. D'une part, dans les habitats peu perturbés, les insectes ont un niveau de spécialisation élevée. D'autre part, dans les habitats perturbés, les généralistes sont favorisés sauf si les spécialistes sont capables de s'acclimater en élargissant leur niche de ressources (i.e. visites d'un plus grand nombre d'habitats différents) (**Figure 52**). Pour répondre à cette question, la méthode décrite par

Marini et al. (2019) est une analyse de réseaux bipartites espèce de pollinisateur – habitat. Elle consiste à échantillonner des pollinisateurs dans différents habitats (modes d'occupation des sols différents) à l'échelle d'un paysage (**Figure 53**). Le paysage est ensuite classé en habitats plus ou moins visités par chaque espèce d'insectes sous forme de réseau. Une étude reprenant cette méthodologie a été conduite récemment sur 15 paysages en Italie pour les auxiliaires de cultures (carabes et araignées) et 10 paysages en Allemagne pour les pollinisateurs (abeilles et syrphes) (Lami et al., 2021). Le jeu de données très conséquent est constitué de 30 572 carabes (104 espèces), 7002 araignées (94 espèces), 7146 abeilles sauvages (109 espèces) et 3433 syrphes (74 espèces). Les résultats mettent en évidence que les carabes sont capables de mieux répondre à une diminution du pourcentage d'habitats semi-naturels que les araignées en élargissant leurs niches de ressources. Les pollinisateurs sont plus sensibles à la densité de patches d'habitats qu'à la composition du paysage (pourcentage d'habitats semi-naturels). **Les syrphes sont plus capables de modifier leur niveau de spécialisation que les abeilles sauvages.** Lorsque le pourcentage d'habitats semi-naturels augmente, les populations appartenant à la même espèce visitent un plus grand nombre d'habitats et sont plus généralistes. **Cette étude met donc en évidence deux stratégies différentes : soit une flexibilité dans l'exploitation des ressources lorsque le paysage change (carabes et syrphes) soit une spécialisation pour les habitats maintenue qui engendre plus de risques lorsque le paysage change (araignées et abeilles sauvages).**



métriques de réseaux bipartites, telles que la modularité et la connectance⁴, permettent de saisir ces changements de communauté au niveau du réseau entier. En échantillonnant la même espèce sur plusieurs réseaux et en calculant les mesures au niveau des espèces, il est également possible de mesurer la variation intraspécifique de la spécialisation sur ces gradients paysagers (d). Source : Lami et al. (2021).

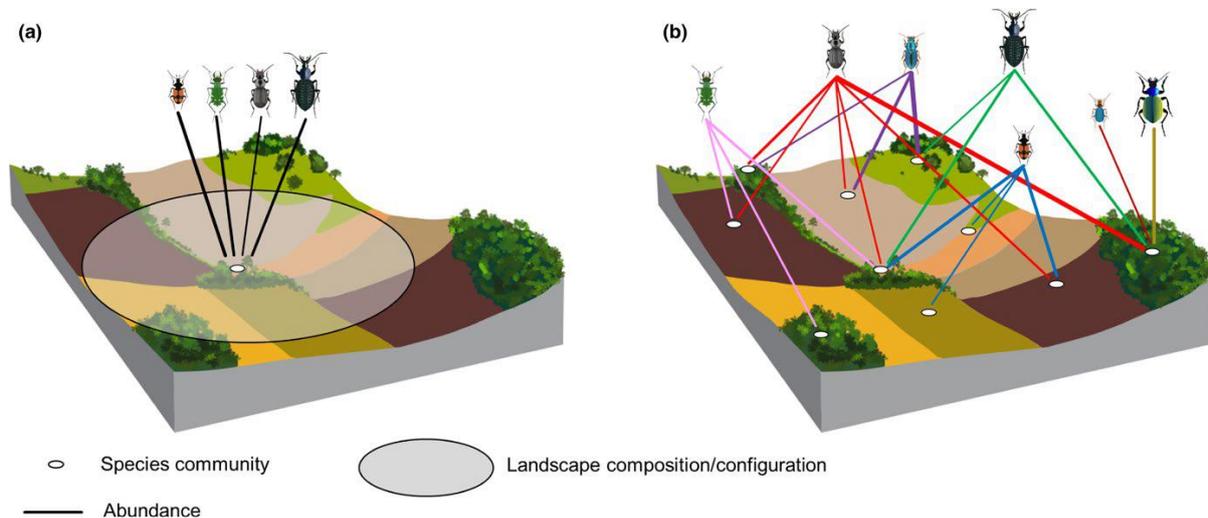


Figure 53. Schéma représentant deux approches d'échantillonnage de communautés de pollinisateurs à l'échelle des paysages. A gauche (a), l'approche traditionnelle qui consiste à échantillonner les insectes dans un habitat et à caractériser le paysage alentour en termes de composition et de configuration. A droite (b), une nouvelle approche qui consiste à échantillonner les insectes dans les différents habitats constituant le paysage. Le paysage peut alors être classé en différents patches selon le rôle fonctionnel de chaque habitat pour les pollinisateurs de la communauté. La largeur des lignes du réseau est proportionnelle à l'abondance de chaque espèce. Source : Marini et al. (2019).

Démarche scientifique

Afin de mobiliser mes connaissances en écologie des communautés et de développer mes compétences sur les réseaux d'interactions, **je propose de développer une approche réseau espèce – habitat pour identifier les réponses des pollinisateurs au changement de paysage agricole.** Cette démarche pourrait être développée dans différents sites d'étude. Par exemple au LAE, mon collègue Gaël Caro a pérennisé un réseau de parcelles d'agriculteurs « Praicol » et suit, depuis 2015, 21 prairies permanentes (35 depuis 2019) dont la moitié sont couplées à des cultures annuelles qui sont également suivies. Un échantillonnage des macro-invertébrés y est réalisé deux fois par an (au printemps et à l'automne) pendant sept jours consécutifs. Un suivi de 8 paysages différents et 20 habitats est réalisé et l'évolution des pratiques agricoles a été suivie par un gros travail d'enquêtes. Nous avons commencé à échanger sur la possibilité de déposer un projet plus spécifique sur les pollinisateurs que je coordonnerais. **L'objectif serait d'y appliquer la méthodologie de réseau espèce – habitat pour comprendre l'influence des variables paysagères (configuration, composition mais aussi pratiques agricoles) sur la spécialisation des populations de pollinisateurs et d'identifier leurs capacités à s'acclimater**

⁴ La connectance est définie comme le rapport entre le nombre observé d'interactions et le nombre maximal d'interactions qui pourrait être réalisé dans le réseau.

au changement. Ces travaux pourraient permettre par la suite de réfléchir à des trajectoires collectives d'aménagement paysager co-construits par les acteurs qui favorisent le contrôle biologique des ravageurs et les pollinisateurs.

Je souhaite également sur ces questions d'aménagement étudier l'effet des pratiques favorables à la diversité fonctionnelle florale autochtone sur les communautés de pollinisateurs en lien avec les gestionnaires locaux. Je vais prochainement m'impliquer dans le « Plan national en faveur des insectes pollinisateurs et de la pollinisation » (2021-2026) qui vise à préserver les insectes pollinisateurs sauvages et domestiques en renforçant les synergies entre acteurs. Plus particulièrement, j'ai été sollicitée pour participer au comité d'experts de l'axe 6 : « partage des pratiques favorables aux pollinisateurs » qui vise à recenser et valoriser un maximum d'initiatives de terrain favorables aux pollinisateurs afin de les démultiplier dans les territoires auprès des différents acteurs (agriculteurs, conseillers agricoles, collectivités territoriales... Cette dynamique collective de changement fait aussi écho au projet Be Creative (2021-2027) auquel je participe et qui vise à co-construire des territoires sans pesticide avec les acteurs.

2.3. Aménager les espaces verts urbains pour conserver les insectes pollinisateurs

Contexte

La conservation des pollinisateurs ne s'arrête pas à la limite des agrosystèmes. En effet, d'une part ces organismes sont mobiles (avec une distance de vol d'une centaine de mètres à plusieurs kilomètres selon les espèces) et d'autre part les habitats sont connectés entre eux. La préservation de ces insectes et de la trame verte nécessite donc d'étudier leurs potentiels lieux de refuge. Un des lieux de refuge identifié dans la bibliographie sont les espaces verts urbains. Des études récentes montrent que les villes pourraient être des refuges pour les pollinisateurs (e.g. Hall et al., 2017), plus favorables que les zones agricoles, à condition qu'elles soient bien aménagées. Parmi 74 études analysées par Wenzel et al. (2020), 24 % montrent un effet négatif de l'urbanisation sur les communautés de pollinisateurs, 39 % un effet neutre et 37 % un effet positif. Les espaces urbains sont gérés sans pesticide (Loi Labbé) et peuvent être très riches en ressources florales. Les parcs et les jardins partagés sont des habitats qui peuvent accueillir une importante diversité et abondance de pollinisateurs, notamment des Diptères dans les villes au Royaume-Uni par exemple (Baldock et al., 2019). Cette même étude montre le rôle important des communautés florales avec un effet positif de l'abondance des fleurs sur la richesse et l'abondance des pollinisateurs. Les Hyménoptères sont généralement les pollinisateurs majoritaires en ville et les habitats urbains seraient moins favorables aux Diptères et aux Lépidoptères que les milieux ruraux comme l'illustre une récente étude sur 18 sites en Allemagne (Theodorou et al., 2017).

Parmi les plantes urbaines, les plantes ornementales peuvent occuper une place importante. Généralement, ce sont des plantes allochtones, gérées dans des massifs dédiés et retournées annuellement. Elles ont été modifiées et sélectionnées par l'Homme afin d'être agréables à l'œil humain. D'ailleurs, une étude récente de Ruiz-Hernández et al. (2021), démontre que « les humains partagent plus de préférences pour les phénotypes floraux avec les pollinisateurs qu'avec les ravageurs ».

Comme dit précédemment le réchauffement climatique modifie la phénologie des plantes et des insectes et leurs périodes d'interaction (Hegland et al., 2009). **En climat tempéré, les villes peuvent ainsi avoir des ressources florales réduites notamment pendant les mois d'été lorsque les pollinisateurs peuvent être très abondants.** Les études de l'effet des sécheresses sur les récompenses florales sont rares, notamment en milieu tempéré. L'étude de Phillips et al. (2018) montre que les fleurs contenant du nectar peuvent être moins nombreuses en cas de sécheresse pour certaines espèces. Dans une revue récente, Descamps et al. (2021) montrent la variabilité de réponse des traits floraux à la sécheresse avec néanmoins une prédominance d'effets négatifs sur l'attractivité, l'accessibilité et les récompenses pour les pollinisateurs (résultats détaillés trait par trait dans le tableau 2 de l'article cité).

Pour maintenir la biodiversité des pollinisateurs dans les espaces urbains, il semble nécessaire de favoriser des ressources florales attractives tout au long de la saison de végétation et des corridors écologiques pour la circulation des espèces. **Ces aménagements nécessitent l'acquisition de connaissances sur le paysage urbain et les ressources florales et des actions concertées avec les gestionnaires d'espaces verts dans les villes.** Les connaissances sur les traits floraux sont encore lacunaires, notamment sur les espèces fleuries choisies dans les assemblages urbains et sont pourtant essentielles pour conserver les pollinisateurs et aider à l'aménagement des villes.

Démarche scientifique

L'objectif de mon projet est d'aménager les espaces urbains pour favoriser la conservation des pollinisateurs. **Ma démarche est d'étudier plus particulièrement la mise en place de communautés florales complémentaires dans le temps et l'espace et résistantes à la sécheresse à l'échelle des métropoles.** Pour cela, je m'appuierai sur un projet en cours de réalisation que je coordonne (Grand Nancy terre de pollinisateurs, 2021-2023). Les objectifs du projet sont de (1) connaître la biodiversité des plantes et des pollinisateurs de la métropole, (2) identifier les modes de gestion les plus adaptés au maintien des pollinisateurs sauvages, (3) planter des assemblages fleuris adaptés à la sécheresse et aux pollinisateurs, (4) mettre en place des formations pour les gestionnaires d'espaces verts et diffuser les pratiques favorables aux pollinisateurs et (5) sensibiliser les citoyens aux pollinisateurs sauvages en ville. L'objectif principal est d'améliorer la gestion des ressources florales en ville pour les pollinisateurs dans la métropole de Nancy. **Les leviers identifiés sont la gestion différenciée des prairies dans les espaces verts urbains (fauche raisonnée, présence continue de fleurs) et l'optimisation de massifs ornementaux favorables aux pollinisateurs et plus résistants à la sécheresse.** Nous travaillerons en concertation avec les gestionnaires de la ville de Nancy (Loïc Delagneau et Lucie Jouanet) et de la métropole de Nancy (Julien Soret), également partenaires du projet.

Nous avons déjà réalisé un inventaire des pollinisateurs sur 12 espaces verts de la métropole de Nancy en 2021 (Figure 54). Nous avons réalisé un travail de cartographie de chaque espace vert et de son paysage environnant avec mes collègues Nadia Michel et Hélène Huin (LAE) et trois stagiaires de M2. Durant l'année 2021, sur 6 sessions d'échantillonnage de mars à septembre, 3924 individus ont été capturés par une méthode passive avec 6 coupelles posées 2h sur chaque site et 2481 individus ont été capturés au filet en butinage actif dont 2127 sont identifiés à l'espèce actuellement. Parmi les pollinisateurs capturés au filet, les Hyménoptères représentent 62 % des individus (dont 33 % d'abeilles domestiques, 11 % de bourdons et 19 % d'autres Hyménoptères sauvages), 23 % des individus sont des Diptères (dont 14 % de

syrrhes et 8 % d'autres diptères) 8 % des Lépidoptères et 6 % des Coléoptères. L'inventaire des captures au filet a permis de recenser 111 espèces d'hyménoptères sauvages, 44 espèces de coléoptères, 30 espèces de syrphes et 19 espèces de lépidoptères au sein de la Métropole.

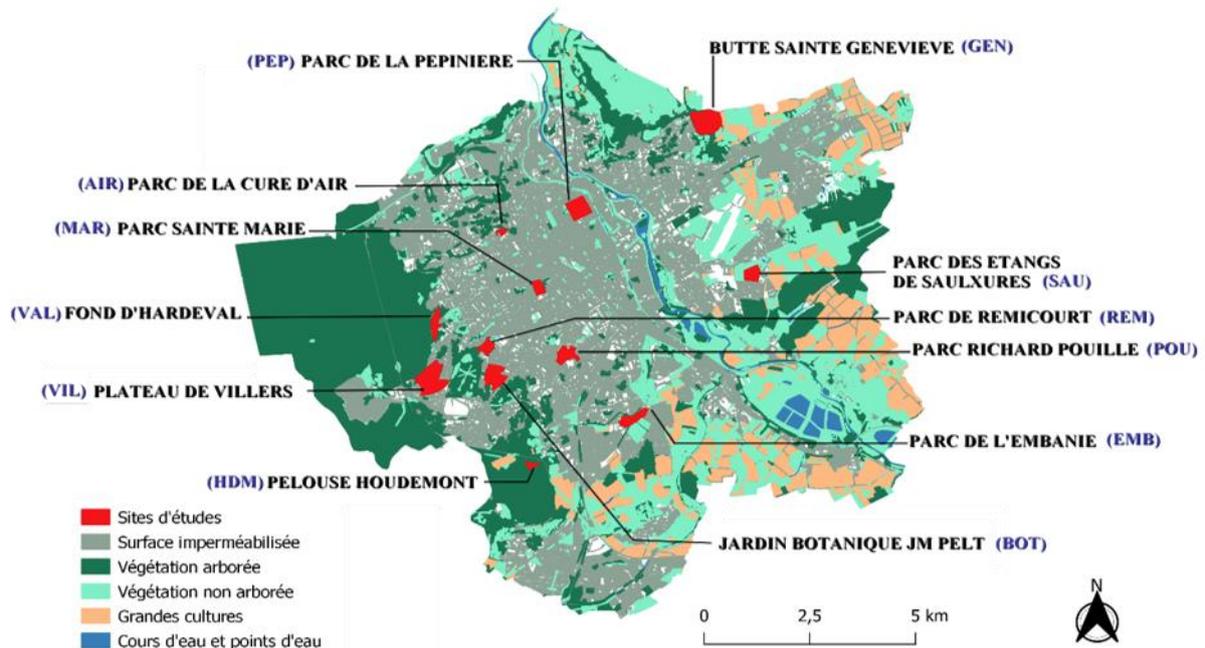


Figure 54. Localisation des 12 espaces verts suivis dans le cadre du projet Grand Nancy terre de pollinisateurs en 2021 à l'échelle de la métropole de Nancy.

Une fois ces communautés recensées, nous identifierons les communautés végétales les plus attractives pour les pollinisateurs en termes taxinomiques et fonctionnelles (en complétant nos mesures de traits floraux déjà acquises pour l'aire florale par des mesures de traits d'accessibilité et de récompense sur les espèces majoritairement visitées par les pollinisateurs ou dominantes dans les communautés fleuries). Nos résultats sont communiqués et diffusés aux gestionnaires afin qu'à l'échelle de chaque espace vert, ils aient connaissance de la diversité et de l'abondance des pollinisateurs (tout taxon confondu) et des communautés végétales les plus visitées par ceux-ci. Pour cela, nous avons réalisé plusieurs enquêtes auprès des gestionnaires et je travaille en coordination avec Anne Vallet du bureau d'études Entomologic. Pour la suite, nous continuerons à sensibiliser et former les gestionnaires en les renseignant sur les observations effectuées lors du projet.

J'ai également développé une approche pour caractériser fonctionnellement les plantes ornementales pour les pollinisateurs. En effet, face au réchauffement climatique, il est indispensable de planter des massifs ornementaux économes en eau et qui apportent des ressources florales en fin de saison en résistant à la sécheresse. **Nous souhaitons identifier les plantes ornementales attractives pour les insectes et résistantes à la sécheresse.** Ce travail est réalisé en étroite collaboration avec la ville de Nancy et nous utilisons aussi les serres municipales pour réaliser nos expérimentations qui se sont achevées très récemment en août 2022. Lors du stage de M2 de Margaux Quinzoni, nous avons ainsi sélectionné 11 espèces ornementales appartenant à 6 familles de plantes différentes qui ont été notées comme plus ou moins attractives pour les pollinisateurs par les gestionnaires de la ville de Nancy à partir d'observations réalisées *in situ*. Douze individus par espèce ont été soumis à un

traitement témoin et un traitement « sécheresse » avec une réduction de leur volume d'arrosage et de la fréquence d'arrosage pendant six semaines (n = 264 plantes). Les tout premiers résultats montrent une diminution importante (de 15 à 45 %) des traits morphologiques (hauteur et aires florales) pour presque toutes les espèces soumises à la sécheresse et des réponses contrastées en termes de quantité de nectar avec des diminutions de la concentration en sucres pour certaines espèces sous l'effet de la sécheresse et aucun effet significatif pour d'autres. D'autres mesures de traits floraux vont compléter ce jeu de données dans les mois à venir. Des observations des visites de pollinisateurs sur ces espèces ornementales plantées dans cinq massifs adjacents montrent qu'elles peuvent attirer des morphotypes contrastés et qu'elles sont donc toutes des ressources complémentaires en termes de diversité pour les pollinisateurs.

A plus long terme, la suite de mon projet, outre la valorisation de ces travaux pourrait se composer en deux parties :

1. étudier la réponse des communautés de pollinisateurs au gradient d'urbanisation au sein de la métropole de Nancy en utilisant une approche de réseau espèce – habitat (détaillé précédemment dans le paragraphe 2.2 du projet). Cette analyse permettrait de déterminer si les pollinisateurs changent leur niveau de spécialisation pour les ressources selon la pression d'urbanisation mais également d'identifier les habitats les plus visités selon le gradient d'urbanisation. Ce projet demande à être affiné par la suite ;

2. réfléchir aux changements de pratiques à mettre en œuvre dans les métropoles urbaines pour favoriser la biodiversité et comparer ces changements à ceux des agriculteurs en milieu agricole. Ce projet est plutôt une réflexion méthodologique pour l'évolution de la gestion de nos espaces urbains et agricoles. Nous co-organisons un symposium qui s'intitule « Pollinator conservation in urban and agricultural environments: comparison of management practices » au colloque « Ecology and Evolution: new perspectives and societal challenges » sur cette thématique avec Isabelle Dajoz (IEES) et Nadia Michel (LAE).

2.4. Lutte écologique contre les espèces invasives par compétition végétale

Favoriser une gestion sans pesticide (ou a minima en les diminuant drastiquement) semble être un des leviers pour améliorer l'état de conservation des pollinisateurs et des services qui leurs sont associés ainsi que la santé humaine. **La généralisation de ces pratiques de gestion aux agrosystèmes nécessite des modèles réussis dans d'autres types d'écosystèmes.** Comme annoncé récemment : « la SNCF confirme l'arrêt en 2022 de l'utilisation du glyphosate pour désherber les voies » (France info 2021). Les études de la SNCF pourront se développer sur la lutte végétale par implantation d'espèces prairiales sur des zones envahies par des espèces invasives, encore plus difficiles à contrôler sans utilisation d'herbicide. **Etant consciente que je dois resserrer mes activités et mes travaux de recherche, je compte finaliser mes travaux sur la lutte écologique contre les espèces invasives par compétition végétale ces prochaines années en valorisant les résultats obtenus sous forme de publications.** A priori, sauf renforcement thématique au LAE ou poursuite de partenariat, je ne me projette pas dans de nouveaux projets sur cette question de recherche, d'autant que mes deux collègues qui travaillent sur ce sujet avec moi quittent le laboratoire prochainement. Je continuerai néanmoins à suivre les travaux de l'association SPIGEST ces prochaines années.

3. Evaluer le service de pollinisation de la parcelle au territoire agricole

3.1. Quantifier la pollinisation à l'échelle des territoires

Contexte

La transition agroécologique nécessite la mise en place de territoires⁵ agricoles qui reposent sur des régulations biologiques accrues permettant une réduction de l'utilisation des intrants. Ces territoires doivent s'appuyer sur une connaissance et une gestion optimisée de la biodiversité à différentes échelles (Thérond et al., 2017) afin de concevoir des agroécosystèmes répondant aux attentes des agriculteurs et de la société en termes de d'avantages socio-économiques. Parmi les services contribuant à la production agricole, ceux de fertilité du sol et les services liés aux cycles des éléments sont de loin les plus étudiés (Tamburini et al., 2020). À l'inverse, le service de contrôle biologique des ravageurs, et plus encore celui de pollinisation, ont été beaucoup moins considérés. Pourtant, optimiser le service de pollinisation des espèces cultivées peut être une solution pour maintenir les rendements agricoles dans des territoires économes en pesticides. Une étude récente de Catarino et al. (2019) montre par exemple que le rendement et la marge brute sont plus importants dans les champs de colza ayant une forte abondance de pollinisateurs et que cet effet est fortement réduit par l'utilisation de pesticides. Cependant, les études caractérisant les effets d'une réduction des pesticides sur le service de pollinisation restent très localisées, en particulier parce que la mesure du service de pollinisation demande beaucoup de moyens et n'est souvent menée qu'à l'échelle de quelques parcelles. Un enjeu essentiel est ainsi de quantifier le service de pollinisation à l'échelle des territoires.

Démarche scientifique

Mes projets de recherche à l'échelle du territoire sont récents. Ils sont principalement issus des échanges et collaborations avec Olivier Thérond (LAE). Cette échelle d'organisation me semble importante à aborder car elle intègre un ensemble d'écosystèmes et de socio-écosystèmes où se jouent des changements de pratique collectifs pour la mise en place de l'agroécologie. Au sein du LAE, les collègues du futur axe 3 « interactions entre agroécologie et bioéconomie » travaillent à cette échelle spatiale avec une question qui est : « comment caractériser, modéliser et évaluer les systèmes agroécologiques et bioéconomiques et leurs interactions dans les territoires ? » Leurs compétences sur cette thématique sont donc précieuses et bien établies. Mon premier objectif est de quantifier le service de pollinisation à l'échelle donc des territoires. Pour cela, **nous proposons tout d'abord de réaliser une synthèse bibliographique sur l'effet des structures paysagères et des pratiques agricoles sur l'abondance et la diversité des insectes pollinisateurs en plaine agricole.** Ce travail est un objectif de la thèse de Camille Gay que je co-encadre depuis octobre 2021 avec Olivier Thérond et Nadia Michel (LAE). L'approche utilisée pour quantifier les liens entre déterminants paysagers et diversité des pollinisateurs est une approche par « Fuzzy cognitive maps », c'est-à-dire une représentation des relations causales avec un poids attribué (Kok et

⁵ Espace continu et borné qui détermine en partie l'identité de ceux qui l'utilisent. Cet espace offre à la fois des ressources matérielles (sol, eau, écosystèmes, etc.) et immatérielles (culture, image, etc.), pour lesquelles les acteurs coopèrent ou ne coopèrent pas.

al., 2009). Cette thèse devrait se poursuivre par le développement ou l'adaptation d'un modèle de prédiction de l'abondance et de la diversité des insectes pollinisateurs au sein des paysages agricoles et une calibration et validation de ce modèle sur une base de données expérimentales.

Dans un deuxième projet, nous effectuerons un travail plus spécifique sur le calcul et la comparaison d'indicateurs de pollinisation à l'échelle des territoires. Cette étude est l'un des objectifs du stage de M2 de Thibault Gandara qui devrait se poursuivre par une thèse en décembre 2022, co-encadrée par Emmanuelle Porcher (CESCO), Antoine Gardarin (UMR Agronomie) et moi-même. Cette thèse s'inscrit dans les projets ESPRES (2022-2025) et ANR Be Creative (2021-2027) où je coordonne l'action 3.1 qui vise à collecter, analyser et modéliser les connaissances agroécologiques qui déterminent les services écosystémiques et à quantifier ces services et leurs réponses aux changements de pratiques.

Pour ce projet de thèse, deux indicateurs ont déjà été calculés sur le territoire du Fény (plateforme paysagère suivie par l'UMR Agroécologie) qui se compose de 140 parcelles de grandes cultures contiguës (950 ha au total, principalement blé, orge, soja, colza, tournesol et moutarde brune) dans la plaine de Dijon. Vingt-cinq agriculteurs y sont installés avec un gradient de pratiques agricoles sur l'ensemble des exploitations.

Ces indicateurs sont :

- l'indice de pollinisation potentielle de Zulian et al. (2013), basé sur la disponibilité des sites de nidification, les ressources florales accessibles et l'abondance des pollinisateurs. Nous avons utilisé le modèle InVEST (<https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>) qui permet la réalisation d'une cartographie des présences potentielles des pollinisateurs à l'échelle paysagère. Il s'agit d'un service écosystémique de « capacité » si on reprend le cadre conceptuel de Bartholomée & Lavorel (2019) présenté en **Figure 38** ;
- l'indice de pollinisation réalisée de Martin et al. (2019) qui est calculé à partir des données de rendement des cultures et la dépendance de chacune de ces cultures aux pollinisateurs. Il s'agit d'un service écosystémique de « flux » entre écosystème et socio-écosystème selon le cadre conceptuel de Bartholomée et Lavorel (2019) ;

Les premiers résultats suggèrent que les deux indicateurs sont significativement corrélés à l'échelle du territoire et qu'ils ont des variations spatiales qui peuvent être reliées à certaines pratiques agricoles.

La suite de ce projet est de calculer ces indicateurs dans d'autres territoires agricoles :

- le réseau Scarabée (régions Centre et Île-de-France) composé de 32 exploitations agricoles de grandes cultures avec des bandes fleuries pérennes implantées en 2018, qui présentent un gradient en termes de recours à la biodiversité cultivée, au travail du sol et d'usage de pesticides ;
- le domaine de Gotheron (Auvergne Rhône-Alpes) : une mosaïque paysagère de 86 ha, avec de nombreuses haies, des habitats semi-naturels, de l'arboriculture et des cultures assolées avec des pratiques agricoles à faibles intrants.

Je souhaite également développer des enseignements en lien avec ma recherche et cette thématique d'évaluation des services écosystémiques à l'échelle des territoires dans le cadre de la transition agroécologique me semble tout à fait pertinente à renforcer à l'ENSAIA et dans le parcours Ecosafe (Ecosystèmes agricoles et forestiers) du master AETPF.

3.2. Valider les indicateurs à l'échelle du territoire par des données expérimentales

Contexte

Différentes méthodes sont utilisées pour mesurer expérimentalement le service de pollinisation. Elles sont bien décrites dans le **Tableau 5** par (Bartholomé & Lavorel, 2019). Synthétiquement, elles consistent soit en des observations de pollinisateurs, soit en des captures de pollinisateurs, soit en des analyses de pollens (comptages), soit en une quantification de la production (comptage de graines et fruits), soit en des manipulations de pollinisateurs (en changeant leur communauté ou la position des ruches), soit en des sciences participatives.

Tableau 5. Classification des différentes méthodes de mesures expérimentales liées à la pollinisation (repris dans l'article de Bartholomé & Lavorel, 2019)

Typology	Estimation methods
<i>Observations</i>	
Transect-observations	Transects with insect count done walking (for a given time/speed) (count of the visit number, the number of flower visited, total number of flowers). The same approach is applied on circular plots or on a spiral
Observations	Plot observation with a focus on the whole surface or on focal plant(s) during a given time In some large flowers: observations with cameras Follow one individual and count how many flower it visited during a given time and the proportion of the target plant(s) visited on 10 visits Focal observation of one species to note its feeding preferences
<i>Captures</i>	
Moving-net	Transects with captures done with a net or an insect vacuum along a given distance (in a given time)
Static-net	Captures with a net or an insect vacuum during a given time or a given number of net strokes, not along a transect
Traps	Pan traps (of different colours (white, yellow, blue), with different configurations and different durations (from 24 h to more than 96 h)) Other traps (with interception windows, in nest shape, etc.)
<i>Pollen analysis</i>	
Manip-pollen	Experimental designs implying pollinator exclusion at least during a part of the flowering or some hand-pollination Flower isolation: - pollinator exclusion when flowers are at a bud state and then flower presentation to an insect or waiting a first visit and after isolation: removing the stigmas (pollen grain count (all pollen combined or separation of hetero- and conspecific pollen) or counting the obtained number of seeds/fruits) - complete pollinator exclusion (sometimes completed with hand-pollination)
Pollen-insect	Insect captures for: count of pollen grain number on different body parts, estimation of the pollen load.
<i>Harvest</i>	
Count	Count of the number of pollen grains developing pollen tube/of fruits/of seeds
Weighing	Fruit/seed weighing (fresh or dry)
Observation of reproduction	Number of aborted/malformed fruit/seed
Analysis of reproduction	Quality analysis of fruits/seeds (chemical analysis, analysis of shape, etc.) Final harvest
<i>Pollinator manipulation</i>	
Pollinator manipulation	Modification of the pollinator community composition Modification of beehives' configuration
<i>Citizen science</i>	
Citizen science	Use of citizen science for data collection
<i>Literature data</i>	
Literature data	Use of data/information available on historical data bases or publications

Ces méthodes sont généralement mises en place à des échelles spatiales locales, souvent à l'échelle de la parcelle ou du système d'exploitation. **Un des challenges importants est donc de valider les indicateurs de pollinisation établis à l'échelle du territoire par des données expérimentales acquises localement.**

Démarche scientifique

Mon projet est dans la continuité de la quantification de la pollinisation à l'échelle des territoires. Il vise à acquérir des données qui permettent de valider spatialement ces indicateurs. **L'approche que je souhaite développer ici est d'acquérir des données expérimentales avec une stratégie d'échantillonnage pouvant refléter l'hétérogénéité spatiale du territoire étudié.** Des points seront choisis spatialement pour leurs différences en termes d'habitats, de ressources florales locales, de potentiels sites de nidification, de pratiques agricoles et de configuration/composition paysagère. Ensuite, je pense privilégier des observations de morphotypes de pollinisateurs (**pour éviter des méthodes destructives de captures d'insectes**) ou installer des phytomètres (i.e. plantes entomogames utilisées pour mesurer le service de pollinisation) pour mesurer la production de graines et de fruits réalisée ou installer des systèmes de micro-enregistreurs des sons de pollinisateurs (une nouvelle méthode qui semble prometteuse et non destructive). **Je compte mettre en place une démarche de protocoles harmonisés et faisables à l'échelle des territoires agricoles en prenant comme zones d'étude des territoires participant au projet Be Creative.** Pour cela, je m'appuierai sur les collaborations avec les animateurs du WP3 de Be Creative, Antoine Gardarin (UMR Agronomie) et Aude Barbottin (UMR SADAPT) ainsi qu'Emmanuelle Porcher (CESCO). Cette démarche d'acquisition de données dans plusieurs ou régions afin d'en caractériser les différences spatiales ou les généralités est une approche qui me tient à cœur depuis mes premiers travaux de thèse sur les écosystèmes forestiers. J'ai pu la mettre en place dans le projet Polliflor. Elle me semble indispensable à mettre en œuvre pour des analyses collectives de qualité. Je participe d'ailleurs à des protocoles participatifs depuis quelques années (par exemple la disposition de plantes phytomètres dans plusieurs villes de France et Belgique pour évaluer le service de pollinisation, expérimentations réalisées dans le cadre de la thèse d'Arthur Fauvau, IEES ou les récoltes de pollen floraux pour mesurer leur qualité, coordonnées par Anne-Laure Jacquemard, UC Louvain). **Je souhaite continuer à participer à ce type d'expérimentations collectives et également partager les données expérimentales acquises pour une analyse multi-sites.**

3.3. Relier service de pollinisation et service de régulation des ravageurs

Contexte

L'optimisation des services écosystémiques de régulation et l'aménagement des territoires agricoles nécessitent une vision multi-services. Au sein du futur axe 2 du LAE, il est envisagé de travailler sur la synergie ou les compromis entre les services de pollinisation et de régulation des ravageurs par conservation. Ce travail m'intéresse particulièrement. En effet, **un lien important entre pollinisation et régulation des ravageurs est l'aménagement de la diversité fonctionnelle végétale (en particulier florale).** Des résultats récents de Gardarin et al. (2021) suggèrent que les communautés végétales qui fournissent de grandes quantités de nectars accessibles avec des niveaux intermédiaires de diversité fonctionnelle peuvent améliorer le parasitisme de différents herbivores de cultures. De plus, la mise en place de plantes de services (i.e. plante qui apporte un ou plusieurs services écosystémiques à l'agrosystème, plus de détails sur cette définition dans la **Figure 55**) est un aménagement qui se développe dans les agrosystèmes et qui demande d'analyser les synergies et compromis entre services écosystémiques.

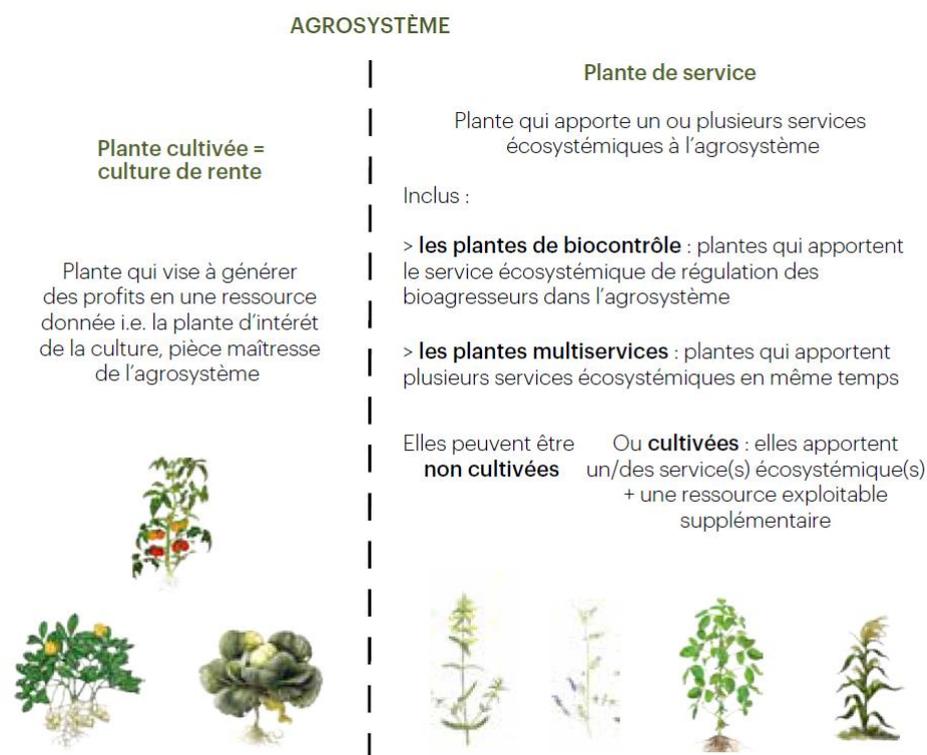


Figure 55. Le rôle des plantes services dans l'agrosystème. Source : Caravel et al. (2020)

Démarche scientifique

Cette thématique est la plus exploratoire pour moi puisque je n'ai pas étudié le service de régulation des ravageurs auparavant. Elle demandera quelques années supplémentaires pour sa mise en place. **L'objectif est de quantifier en parallèle le service de pollinisation et le service de régulation des ravageurs par conservation.** Pour cela, je compte m'appuyer sur des collaborateurs qui analyseront le service de régulation des ravageurs tandis que, dans les mêmes dispositifs expérimentaux, j'étudierai le service de pollinisation. J'ai déjà plusieurs projets qui se mettent en œuvre sur cette question et je souhaite les développer.

Tout d'abord, je participe à la **rédaction d'un article de revue coordonné par Alan Kergunteuil (LAE), qui implique plusieurs collègues du LAE.** Cette publication a pour objectif de présenter les mécanismes écologiques qui sous-tendent cinq stratégies utilisées en biocontrôle : les substances naturelles, les substances sémi-chimiques, les micro- et macro-organismes, les agents de contrôle biologique, mais aussi la diversité végétale et de discuter de leur rôle dans la transition agroécologique multi-échelles.

Ensuite, **dans un projet de livre de synthèse Quae « Les plantes de services et leur usage en agrosystèmes »** coordonné par Caroline Caporalino et Anne-Violette Lavoit, je suis éditrice d'un chapitre qui s'intitule « Les plantes de services favorisant la pollinisation » et co-auteure avec Audrey Alignier (BAGAP), Stéphanie Aviron (BAGAP), Mathilde Baude, Emma Jeavons (BAGAP) et Emmanuelle Porcher (CESCO). La rédaction de ce chapitre m'a permis notamment

d'identifier des déterminants communs entre les services de régulation des ravageurs et de pollinisation pour le choix des plantes de services.

Dans le cadre du projet Be Creative et notamment de la thèse de Thibault Gandara, nous envisageons des expérimentations communes entre les deux services sur le dispositif Scarabée. Nous pourrions par exemple étudier la régulation des ravageurs du colza (altises, méligèthes) par des microhyménoptères parasitoïdes en parallèle au suivi des pollinisateurs, à l'aide de méthodes maîtrisées dans l'UMR agronomie (Antoine Gardarin). Nous analyserons si la réduction d'usage des pesticides favorise la co-occurrence entre les deux services. Ce modèle du colza est particulièrement intéressant pour faire le couplage avec la pollinisation car c'est une plante en partie dépendante des pollinisateurs pour son rendement. **Nous attendons que les systèmes de culture fournissant des ressources et reposant sur peu d'insecticides, favorisent simultanément auxiliaires et pollinisateurs, mais avec des risques de compétition entre les deux.**

Enfin, il est envisageable de faire des liens entre les suivis de macro-invertébrés du sol (notamment carabes et araignées) menés par mon collègue Gaël Caro (LAE) et des suivis de pollinisateurs sur le même réseau de parcelles d'agriculteurs « Praicol » évoqué précédemment.

VI. Conclusion

Mon parcours de recherche a évolué d'années en années en intégrant différentes sous-disciplines de l'écologie. En 2013, j'ai changé de thématique, de l'écophysiologie forestière vers l'écologie des communautés prairiales. Cette transition m'a montrée les possibilités de transcender ses approches initiales par de nouvelles démarches scientifiques. Mes compétences expérimentales forestières et mes études sur le changement climatique m'ont aidée à développer des projets de recherche tournés vers la résilience des écosystèmes. La découverte de l'utilisation des traits fonctionnels pour décrire la diversité des communautés a été le déclenchement de projets mécanistes à des échelles spatiales plus larges. Mon réseau de collaborations s'est reconstitué autour de l'évaluation multi-services des prairies permanentes ce qui m'a permis d'appréhender au mieux ces systèmes complexes au cœur de la transition agroécologique. J'ai voulu apporter une approche originale à l'étude des biens et services en prairie, une démarche qui fait le liant entre écologie fonctionnelle des communautés et écologie de la pollinisation. Cette originalité de nos travaux est à la source de projet inspirants et de collaborations multiples sur les interactions fonctionnelles plantes-pollinisateurs. Un fil rouge de ma recherche pendant ces 10 dernières années est son lien opérationnel avec la gestion, comme un engagement personnel face à la crise écologique. Mes travaux sur la restauration écologique par l'implantation d'espèces prairiales ont contribué à m'inscrire dans des démarches d'aménagement local et dans ces transferts de la recherche vers la gestion.

Forte de toutes ces approches, je propose un projet intégratif, de la parcelle au territoire, inscrit dans l'adaptation au changement et la résilience future de nos agrosystèmes. Pour sa réussite, il reste beaucoup de données à acquérir sur les traits floraux et leurs influences sur les interactions plantes-pollinisateurs. Il faut trouver également des démarches scientifiques qui identifient les évolutions des communautés de pollinisateurs face à des changements rapides. Ces connaissances me permettront, je l'espère, d'élargir mes collaborations à l'international et de développer des indicateurs pour optimiser la gestion des écosystèmes

(agricoles et urbains). Enfin, les changements collectifs se jouent aussi à des échelles spatiales plus larges, c'est pour cette raison que je souhaite spatialiser l'évaluation du service de pollinisation à l'échelle des territoires. Ces travaux renforceront mes collaborations au LAE et ailleurs avec de ma part une contribution particulière à la constitution de protocoles expérimentaux harmonisés pour évaluer la biodiversité et ses réponses au changement de pratiques agricoles. Pour mettre en place une approche encore plus intégrative, il faut penser à étudier parallèlement les services de régulation dans les agrosystèmes. En ce sens, je m'ouvre à des évaluations multi-services à des échelles spatiales et temporelles multiples. En particulier, j'aimerais participer à l'analyse des relations entre pollinisation et contrôle biologique des ravageurs, influencées par la diversité fonctionnelle florale, au cœur de mon projet. Pour la suite de ma carrière, je tenterai d'allier l'ensemble de ces approches de recherche avec mon enseignement et une philosophie qui me tient à cœur : avoir des collaborations enrichissantes humainement et scientifiquement pour un épanouissement professionnel optimum.

VII. Bibliographie

- Alarcón, R. (2010). Congruence between visitation and pollen-transport networks in a California plant–pollinator community. *Oikos*, *119*(1), 35–44. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2009.17694.x>
- Amiaud, B. (2016). *Evolution des surfaces fourragères en France*. Université de technologie ouverte pluripartenaire - Agroécologie pour la production animale et fourragère.
- Bailey, J. P., & Conolly, A. P. (2000). Prize-winners to pariahs—A history of Japanese knotweed s.l. (*Polygonaceae*) in the British Isles. *Watsonia*, *23*(1), 93–110.
- Baldock, K. C. R., Goddard, M. A., Hicks, D. M., Kunin, W. E., Mitschunas, N., Morse, H., Osgathorpe, L. M., Potts, S. G., Robertson, K. M., Scott, A. V., Staniczenko, P. P. A., Stone, G. N., Vaughan, I. P., & Memmott, J. (2019). A systems approach reveals urban pollinator hotspots and conservation opportunities. *Nature Ecology & Evolution*, *3*(3), 363–373. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0769-y>
- Bartholomé, O., & Lavorel, S. (2019). Disentangling the diversity of definitions for the pollination ecosystem service and associated estimation methods. *Ecological Indicators*, *107*, 105576. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105576>
- Bascompte, J., Jordano, P., Melián, C. J., & Olesen, J. M. (2003). The nested assembly of plant–animal mutualistic networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *100*(16), 9383–9387. <https://doi.org/10.1073/pnas.1633576100>
- Bayeur, C., Hennequin, C., Mesbahi, G., & Plantureux, S. (2020). *Les prairies permanentes du massif des Vosges. Typologie agroécologique et diagnostic prairial*. <https://hal.inrae.fr/hal-03018334>
- Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., Ciais, P., Jung, M., Carvalhais, N., Rödenbeck, C., Arain, M. A., Baldocchi, D., Bonan, G. B., Bondeau, A., Cescatti, A., Lasslop, G., Lindroth, A., Lomas, M., Luyssaert, S., Margolis, H., Oleson, K. W., Rouspard, O., ... Papale, D. (2010). Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1184984>
- Blaix, C., Chabrierie, O., Alard, D., Catterou, M., Diquelou, S., Dutoit, T., Lacoux, J., Lemauviel-Lavenant, S., Loucougaray, G., Michelot-Antalik, A., Pacé, M., Tardif, A., & Bonis, A. (2022). *Forage Nutritive Value Shows Synergies with Plant Diversity in a Wide Range of Semi-Natural Grassland Habitats* (SSRN Scholarly Paper No. 4180434). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4180434>
- Brown, J. H., Gillooly, J. F., Allen, A. P., Savage, V. M., & West, G. B. (2004). Toward a Metabolic Theory of Ecology. *Ecology*, *85*(7), 1771–1789. <https://doi.org/10.1890/03-9000>
- Brühl, C. A., Zaller, J. G., Liess, M., & Wogram, J. (2022). The rejection of synthetic pesticides in organic farming has multiple benefits. *Trends in Ecology & Evolution*, *37*(2), 113–114. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.11.001>

- Caravel, C., Rhino, B., Lavoit, A-V., Villeneuve, F., Fournet, S., Gautier, H., Chave, M., Cortesero, A., Nicot, P., Romeo, M., Delporte, M., & Berthelot, C. (2020, November). Agrosystèmes légumiers: Les plantes de service contre les bioagresseurs. *Infos CTIFL, Hors série*, 24.
- Cariveau, D. P., Nayak, G. K., Bartomeus, I., Zientek, J., Ascher, J. S., Gibbs, J., & Winfree, R. (2016). The Allometry of Bee Proboscis Length and Its Uses in Ecology. *PLOS ONE*, 11(3), e0151482. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151482>
- Catarino, R., Bretagnolle, V., Perrot, T., Vialloux, F., & Gaba, S. (2019). Bee pollination outperforms pesticides for oilseed crop production and profitability. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 286(1912), 20191550. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.1550>
- Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G., & Zanne, A. E. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters*, 12(4), 351–366. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>
- Ciais, Ph., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, Chr., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A. D., Friedlingstein, P., Grünwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., ... Valentini, R. (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437(7058), 529–533. <https://doi.org/10.1038/nature03972>
- Collard, J., Mosse, N., Kenens, M., Jurjanz, S., Le Roux, Y., Michelot-Antalik, A., Tehranchi, M., & Montagne, P. (2018). *Guide pratique pour une gestion raisonnée des renouées asiatiques* (p. 14).
- Cornelissen, J. H. C., Lavorel, S., Garnier, E., Diaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D. E., Reich, P. B., ter Steege, H., Morgan, H. D., van der Heijden, M. G. A., Pausas, J. G., & Poorter, H. (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51(4), 335–380. <https://doi.org/10.1071/BT02124>
- Descamps, C., Quinet, M., & Jacquemart, A.-L. (2021). The effects of drought on plant–pollinator interactions: What to expect? *Environmental and Experimental Botany*, 182, 104297. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104297>
- Díaz, S., Lavorel, S., Bello, F. de, Quétier, F., Grigulis, K., & Robson, T. M. (2007). Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), 20684–20689. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704716104>
- Djeddour, D. H., & Shaw, R. H. (2010). The Biological Control of *Fallopia Japonica* in Great Britain: Review and Current Status. *Outlooks on Pest Management*, 21(1), 15–18. <https://doi.org/10.1564/21feb04>
- Dufrêne, E., Davi, H., Francois, C., Le Maire, G., Le Dantec, V., & Granier, A. (2005). Modelling carbon and water cycles in a beech forest. Part I: Model description and uncertainty analysis on modelled NEE. *Ecological Modelling*, 185(2/4), 407–436.
- Duru, M., Therond, O., & Fares, M. (2015). Designing agroecological transitions; A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1237–1257. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0318-x>
- Ebeling, A., Klein, A.-M., Schumacher, J., Weisser, W. W., & Tschardtke, T. (2008). How does plant richness affect pollinator richness and temporal stability of flower visits? *Oikos*, 117(12), 1808–1815. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2008.16819.x>
- E-Vojtkó, A., de Bello, F., Durka, W., Kühn, I., & Götzenberger, L. (2020). The neglected importance of floral traits in trait-based plant community assembly. *Journal of Vegetation Science*, 31(4), 529–539. <https://doi.org/10.1111/jvs.12877>
- Filipiak, M. (2019). Key pollen host plants provide balanced diets for wild bee larvae: A lesson for planting flower strips and hedgerows. *Journal of Applied Ecology*, 56(6), 1410–1418. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13383>
- Fontaine, C., Dajoz, I., Meriguet, J., & Loreau, M. (2005). Functional Diversity of Plant–Pollinator Interaction Webs Enhances the Persistence of Plant Communities. *PLoS Biology*, 4(1), e1. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040001>
- Fornoff, F., Klein, A.-M., Hartig, F., Benadi, G., Venjakob, C., Schaefer, H. M., & Ebeling, A. (2017). Functional flower traits and their diversity drive pollinator visitation. *Oikos*, 126(7), 1020–1030. <https://doi.org/10.1111/oik.03869>

- Fortuna, M. A., & Bascompte, J. (2006). Habitat loss and the structure of plant-animal mutualistic networks. *Ecology Letters*, 9(3), 278–283. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00868.x>
- Fründ, J., Dormann, C. F., Holzschuh, A., & Tschardt, T. (2013). Bee diversity effects on pollination depend on functional complementarity and niche shifts. *Ecology*, 94(9), 2042–2054. <https://doi.org/10.1890/12-1620.1>
- Fründ, J., Linsenmair, K. E., & Blüthgen, N. (2010). Pollinator diversity and specialization in relation to flower diversity. *Oikos*, 119(10), 1581–1590. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18450.x>
- Galliot, J.-N., Hulin, S., Le Henaff, P. M., Farruggia, A., Seytre, L., Perera, S., Dupic, G., Faure, P., & Carrère, P. (2020). *Typologie multifonctionnelle des prairies du Massif central* (Sidam-AEOLE).
- Gardarin, A., Pigot, J., & Valantin-Morison, M. (2021). The hump-shaped effect of plant functional diversity on the biological control of a multi-species pest community. *Scientific Reports*, 11(1), 21635. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01160-2>
- Garnier, E., & Navas, M.-L. (2013). *Diversité fonctionnelle des plantes. Traits des organismes, structure des communautés, propriétés des écosystèmes*. de boeck. <https://www.decitre.fr/livres/diversite-fonctionnelle-des-plantes-9782804175627.html>
- Gaujour, E., Amiaud, B., Mignolet, C., & Plantureux, S. (2012). Factors and processes affecting plant biodiversity in permanent grasslands. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 133–160. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0015-3>
- Goulnik, J. (2019). *Étude fonctionnelle de la fonction de pollinisation entomophile en prairie permanente sous l'effet d'un gradient d'intensification agricole*. Université de Lorraine.
- Goulnik, J., Plantureux, S., Dajoz, I., & Michelot-Antalik, A. (2021). Using matching traits to study the impacts of land-use intensification on plant–pollinator interactions in European grasslands: A Review. *Insects*, 12(8), 680. <https://doi.org/10.3390/insects12080680>
- Goulnik, J., Plantureux, S., Reeth, C. V., Baude, M., Mesbahi, G., & Michelot-Antalik, A. (2020). Facial area and hairiness of pollinators visiting semi-natural grassland wild plants predict their facial pollen load. *Ecological Entomology*, 45(6), 1296–1306. <https://doi.org/10.1111/een.12913>
- Goulnik, J., Plantureux, S., Thery, M., Baude, M., Delattre, M., van Reeth, C., Villerd, J., & Michelot-Antalik, A. (2020). Floral trait functional diversity is related to soil characteristics and positively influences pollination function in semi-natural grasslands. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 301, 107033. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107033>
- Granier, A., Bréda, N., Biron, P., & Villette, S. (1999). A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116(2–3), 269–283.
- Granier, A., Reichstein, M., Bréda, N., Janssens, I. A., Falge, E., Ciais, P., Grunwald, T., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Facini, O., Grassi, G., Heinesch, B., Ilvesniemi, H., Keronen, P., Knohl, A., Kostner, B., Lagergren, F., ... Wang, Q. (2007). Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(1–2), 123–145.
- Grime, J. P. (1998). Benefits of plant diversity to ecosystems: Immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology*, 86(6), 902–910. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1998.00306.x>
- Habel, J. C., Dengler, J., Janišová, M., Török, P., Wellstein, C., & Wiezik, M. (2013). European grassland ecosystems: Threatened hotspots of biodiversity. *Biodiversity and Conservation*, 22(10), 2131–2138. <https://doi.org/10.1007/s10531-013-0537-x>
- Hall, D. M., Camilo, G. R., Tonietto, R. K., Ollerton, J., Ahrné, K., Arduser, M., Ascher, J. S., Baldock, K. C. R., Fowler, R., Frankie, G., Goulson, D., Gunnarsson, B., Hanley, M. E., Jackson, J. I., Langellotto, G., Lowenstein, D., Minor, E. S., Philpott, S. M., Potts, S. G., ... Threlfall, C. G. (2017). The city as a refuge for insect pollinators. *Conservation Biology*, 31(1), 24–29. <https://doi.org/10.1111/cobi.12840>
- Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., Stenmans, W., Müller, A., Sumser, H., Hörden, T., Goulson, D., & Kroon, H. de. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLOS ONE*, 12(10), e0185809. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>

- Hegland, S. J., Nielsen, A., Lázaro, A., Bjerknes, A.-L., & Totland, Ø. (2009). How does climate warming affect plant-pollinator interactions? *Ecology Letters*, 12(2), 184–195. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01269.x>
- Helsen, K., Ceulemans, T., Stevens, C. J., & Honnay, O. (2014). Increasing soil nutrient loads of European semi-natural grasslands strongly alter plant functional diversity independently of species loss. *Ecosystems*, 17(1), 169–181. <https://doi.org/10.1007/s10021-013-9714-8>
- Hudewenz, A., Klein, A.-M., Scherber, C., Stanke, L., Tschardtke, T., Vogel, A., Weigelt, A., Weisser, W. W., & Ebeling, A. (2012). Herbivore and pollinator responses to grassland management intensity along experimental changes in plant species richness. *Biological Conservation*, 150(1), 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.02.024>
- Huyghe, C., De Vlieghe, A., van Gils, B., & Peeters, A. (2014). *Grasslands and herbivore production in Europe and effects of common policies*. Editions Quae. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01189917>
- IPCC. (2007). *Climate change 2007: Synthesis report* (p. 52). Cambridge University Press.
- Jacquemyn, H., Brys, R., & Hermy, M. (2003). Short-term effects of different management regimes on the response of calcareous grassland vegetation to increased nitrogen. *Biological Conservation*, 111(2), 137–147. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(02\)00256-2](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(02)00256-2)
- Jordano, P. (1987). Patterns of Mutualistic Interactions in Pollination and Seed Dispersal: Connectance, Dependence Asymmetries, and Coevolution. *The American Naturalist*, 129(5), 657–677. JSTOR.
- Junker, R. R., Blüthgen, N., Brehm, T., Binkenstein, J., Paulus, J., Martin Schaefer, H., & Stang, M. (2013). Specialization on traits as basis for the niche-breadth of flower visitors and as structuring mechanism of ecological networks. *Functional Ecology*, 27(2), 329–341. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12005>
- Junker, R. R., Blüthgen, N., & Keller, A. (2015). Functional and phylogenetic diversity of plant communities differently affect the structure of flower-visitor interactions and reveal convergences in floral traits. *Evolutionary Ecology*, 29(3), 437–450. <https://doi.org/10.1007/s10682-014-9747-2>
- Junker, R. R., & Parachnowitsch, A. L. (2015). Working towards a holistic view on flower traits—How floral scents mediate plant–animal interactions in concert with other floral characters. *Journal of the Indian Institute of Science*, 95(1), 43–68.
- Kattge, J., Díaz, S., Lavorel, S., Prentice, I. C., Leadley, P., Bönnisch, G., Garnier, E., Westoby, M., Reich, P. B., Wright, I. J., Cornelissen, J. H. C., Violle, C., Harrison, S. P., Van BODEGOM, P. M., Reichstein, M., Enquist, B. J., Soudzilovskaia, N. A., Ackerly, D. D., Anand, M., ... Wirth, C. (2011). TRY – a global database of plant traits. *Global Change Biology*, 17(9), 2905–2935. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02451.x>
- Klaus, F., Tschardtke, T., Uhler, J., & Grass, I. (2021). Calcareous grassland fragments as sources of bee pollinators for the surrounding agricultural landscape. *Global Ecology and Conservation*, 26, e01474. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01474>
- Kok, K., Veldkamp, A., & Vliet, M. van. (2009). The potential of Fuzzy Cognitive Maps to study land dynamics. *GLP News*, 5, 18–20.
- Kormann, U., Rösch, V., Batáry, P., Tschardtke, T., Orci, K. M., Samu, F., & Scherber, C. (2015). Local and landscape management drive trait-mediated biodiversity of nine taxa on small grassland fragments. *Diversity and Distributions*, 21(10), 1204–1217. <https://doi.org/10.1111/ddi.12324>
- Krebs, C. J. (1994). *Ecology: The Experimental Analysis of Distribution and Abundance*. HarperCollins College Publishers.
- Laakso, J., Kaitala, V., & Ranta, E. (2001). How does environmental variation translate into biological processes? *Oikos*, 92(1), 119–122. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2001.920114.x>
- Lami, F., Bartomeus, I., Nardi, D., Beduschi, T., Boscutti, F., Pantini, P., Santoiemma, G., Scherber, C., Tschardtke, T., & Marini, L. (2021). Species–habitat networks elucidate landscape effects on habitat specialisation of natural enemies and pollinators. *Ecology Letters*, 24(2), 288–297. <https://doi.org/10.1111/ele.13642>
- Lavorel, S., Storkey, J., Bardgett, R. D., de Bello, F., Berg, M. P., Le Roux, X., Moretti, M., Mulder, C., Pakeman, R. J., Díaz, S., & Harrington, R. (2013). A novel framework for linking functional diversity of plants with other

- trophic levels for the quantification of ecosystem services. *Journal of Vegetation Science*, 24(5), 942–948. <https://doi.org/10.1111/jvs.12083>
- Lazaro, A., Tscheulin, T., Devalez, J., Nakas, G., & Petanidou, T. (2016). Effects of grazing intensity on pollinator abundance and diversity, and on pollination services. *Ecological Entomology*, 41(4), 400–412. <https://doi.org/10.1111/een.12310>
 - Le Provost, G., Gross, N., Börger, L., Deraison, H., Roncoroni, M., & Badenhausser, I. (2017). Trait-matching and mass effect determine the functional response of herbivore communities to land-use intensification. *Functional Ecology*, 31(8), 1600–1611. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12849>
 - Lerch, S., Sirguy, C., Michelot-Antalik, A., & Jurjanz, S. (2022). Accumulation of metallic trace elements in *Reynoutria japonica*: A risk assessment for plant biomass valorization. *Environmental Science and Pollution Research International*. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20485-7>
 - Lortie, C. J., Brooker, R. W., Choler, P., Kikvidze, Z., Michalet, R., Pugnaire, F. I., & Callaway, R. M. (2004). Rethinking plant community theory. *Oikos*, 107(2), 433–438. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2004.13250.x>
 - Lundgren, R., Totland, Ø., & Lázaro, A. (2016). Experimental simulation of pollinator decline causes community-wide reductions in seedling diversity and abundance. *Ecology*, 97(6), 1420–1430.
 - Mandák, B., Pyšek, P., & Bímová, K. (2004). History of the invasion and distribution of *Reynoutria* taxa in the Czech Republic: A hybrid spreading faster than its parents. *Preslia*, 76(1), 15–64.
 - Marini, L., Bartomeus, I., Rader, R., & Lami, F. (2019). Species–habitat networks: A tool to improve landscape management for conservation. *Journal of Applied Ecology*, 56(4), 923–928. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13337>
 - Marrec, R., Brusse, T., & Caro, G. (2022). Biodiversity-friendly agricultural landscapes – integrating farming practices and spatiotemporal dynamics. *Trends in Ecology & Evolution*, 37(9), 731–733. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.05.004>
 - Martin, G., Fontaine, C., Accatino, F., & Porcher, E. (2019). New indices for rapid assessment of pollination services based on crop yield data: France as a case study. *Ecological Indicators*, 101, 355–363. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.022>
 - Mason, N. W. H., Mouillot, D., Lee, W. G., & Wilson, J. B. (2005). Functional richness, functional evenness and functional divergence: The primary components of functional diversity. *Oikos*, 111(1), 112–118. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.13886.x>
 - Memmott, J., Waser, N. M., & Price, M. V. (2004). Tolerance of pollination networks to species extinctions. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 271(1557), 2605–2611. <https://doi.org/10.1098/rspb.2004.2909>
 - Mesbahi, G., Michelot-Antalik, A., Goulnik, J., & Plantureux, S. (2020). Permanent grassland classifications predict agronomic and environmental characteristics well, but not ecological characteristics. *Ecological Indicators*, 110, 105956. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105956>
 - Michaud, A., Carrère, P., Farruggia, A., Jeangros, B., Orth, D., Pauthenet, Y., & Plantureux, S. (2013). *Construire des typologies de prairies pour évaluer leur potentiel à rendre des services agro-environnementaux*. 213, 35–44.
 - Michelot-Antalik, A., Michel, N., Goulnik, J., Blanchetête, A., Delacroix, E., Faivre-Rampant, P., Fiorelli, J.-L., Galliot, J.-N., Genoud, D., Lanore, L., Le Clainche, I., Le Paslier, M. C., Novak, S., Odoux, J.-F., Brunel, D., & Farruggia, A. (2021). Comparison of grassland plant-pollinator networks on dairy farms in three contrasting French landscapes. *Acta Oecologica*, 112, 103763. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2021.103763>
 - Moretti, M., Dias, A. T. C., Bello, F. de, Altermatt, F., Chown, S. L., Azcárate, F. M., Bell, J. R., Fournier, B., Hedde, M., Hortal, J., Ibanez, S., Öckinger, E., Sousa, J. P., Eilers, J., & Berg, M. P. (2017). Handbook of protocols for standardized measurement of terrestrial invertebrate functional traits. *Functional Ecology*, 31(3), 558–567. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12776>
 - Müller, A., Diener, S., Schnyder, S., Stutz, K., Sedivy, C., & Dorn, S. (2006). Quantitative pollen requirements of solitary bees: Implications for bee conservation and the evolution of bee–flower relationships. *Biological Conservation*, 130(4), 604–615. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.01.023>

- Ollerton, J., Winfree, R., & Tarrant, S. (2011). How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*, 120(3), 321–326. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18644.x>
- Orford, K. A., Murray, P. J., Vaughan, I. P., & Memmott, J. (2016). Modest enhancements to conventional grassland diversity improve the provision of pollination services. *The Journal of Applied Ecology*, 53(3), 906–915. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12608>
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., de Vos, A. C., ... Cornelissen, J. H. C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167. <https://doi.org/10.1071/BT12225>
- Phillips, B. B., Shaw, R. F., Holland, M. J., Fry, E. L., Bardgett, R. D., Bullock, J. M., & Osborne, J. L. (2018). Drought reduces floral resources for pollinators. *Global Change Biology*, 24(7), 3226–3235. <https://doi.org/10.1111/gcb.14130>
- Pimm, S. L., Jenkins, C. N., Abell, R., Brooks, T. M., Gittleman, J. L., Joppa, L. N., Raven, P. H., Roberts, C. M., & Sexton, J. O. (2014). The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1246752>
- Pottier, E., Michaud, A., Farrie, J. P., Plantureux, S., & Baumont, R. (2012). *Les prairies permanentes françaises au cœur d'enjeux agricoles et environnementaux: De nouveaux outils pour une approche nouvelle de leur gestion*. 25, 85–97.
- Potts, S. G., Biesmeijer, J. C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., & Kunin, W. E. (2010). Global pollinator declines: Trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(6), 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.01.007>
- Poutaraud, A., Michelot-Antalik, A., & Plantureux, S. (2017). Grasslands: A Source of Secondary Metabolites for Livestock Health. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(31), 6535–6553. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00425>
- Praz, C. J., Müller, A., & Dorn, S. (2008). Specialized bees fail to develop on non-host pollen: Do plants chemically protect their pollen? *Ecology*, 89(3), 795–804. <https://doi.org/10.1890/07-0751.1>
- Rascher, K. G., Maguas, C., & Werner, C. (2010). On the use of phloem sap $\delta^{13}\text{C}$ as an indicator of canopy carbon discrimination. *Tree Physiology*, 30(12), 1499–1514. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq092>
- Ricou, C., Schneller, C., Amiaud, B., Plantureux, S., & Bockstaller, C. (2014). A vegetation-based indicator to assess the pollination value of field margin flora. *Ecological Indicators*, 45, 320–331. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.03.022>
- Robert, M., & Saugier, B. (2003). Contribution of terrestrial ecosystems to carbon sequestration. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(6–7), 577–595.
- Roddy, A. B., Martínez-Perez, C., Teixido, A. L., Cornelissen, T. G., Olson, M. E., Oliveira, R. S., & Silveira, F. A. O. (2021). Towards the flower economics spectrum. *New Phytologist*, 229(2), 665–672. <https://doi.org/10.1111/nph.16823>
- Ruiz-Hernández, V., Joubert, L., Rodríguez-Gómez, A., Artuso, S., Pattrick, J. G., Gómez, P. A., Eckerstorfer, S., Brandauer, S. S., Trcka-Rojas, C. G. I., Martínez-Reina, L., Booth, J., Lau-Zhu, A., Weiss, J., Bielza, P., Glover, B. J., Junker, R. R., & Egea-Cortines, M. (2021). Humans share more preferences for floral phenotypes with pollinators than with pests. *Frontiers in Plant Science*, 12, 647347. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.647347>
- Schleuning, M., Fründ, J., & García, D. (2015). Predicting ecosystem functions from biodiversity and mutualistic networks: An extension of trait-based concepts to plant-animal interactions. *Ecography*, 38(4), 380–392. <https://doi.org/10.1111/ecog.00983>
- Seibold, S., Gossner, M. M., Simons, N. K., Blüthgen, N., Müller, J., Ambarlı, D., Ammer, C., Bauhus, J., Fischer, M., Habel, J. C., Linsenmair, K. E., Nauss, T., Penone, C., Prati, D., Schall, P., Schulze, E.-D., Vogt, J., Wöllauer, S., & Weisser, W. W. (2019). Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature*, 574(7780), 671–674. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1684-3>

- Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Aughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., Vyas, P., Huntley, E., ... Malley, J. (Eds.). (2019). IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In *Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*.
- Sjödin, N. E., Bengtsson, J., & Ekbom, B. (2008). The influence of grazing intensity and landscape composition on the diversity and abundance of flower-visiting insects. *Journal of Applied Ecology*, 45(3), 763–772. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01443.x>
- Steffan-Dewenter, I., Münzenberg, U., Bürger, C., Thies, C., & Tscharntke, T. (2002). Scale-dependent effects of landscape context on three pollinator guilds. *Ecology*, 83(5), 1421–1432. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[1421:SDEOLC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[1421:SDEOLC]2.0.CO;2)
- Steffan-Dewenter, I., & Tscharntke, T. (1999). Effects of habitat isolation on pollinator communities and seed set. *Oecologia*, 121, 432–440. <https://doi.org/10.1007/s004420050949>
- Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T. C., Kremen, C., Heijden, M. G. A. van der, Liebman, M., & Hallin, S. (2020). Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*, 6(45), eaba1715. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1715>
- Taugourdeau, S., Louault, F., Michelot-Antalik, A., Messad, S., Munoz, F., Bastianelli, Carrère, P., & Plantureux, S. (submitted). A set of ecosystem service indicators for European grasslands based on botanical surveys. *Ecosystem Services*.
- Taugourdeau, S., & Messad, S. (2017). *TATALE : Tools for assessment with transformation and aggregation using simple logic and expertise. Manual (Version March 2017)*. (p. 11). CIRAD-ES-UMR SELMET.
- Theodorou, P., Albig, K., Radzevičiūtė, R., Settele, J., Schweiger, O., Murray, T. E., & Paxton, R. J. (2017). The structure of flower visitor networks in relation to pollination across an agricultural to urban gradient. *Functional Ecology*, 31(4), 838–847. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12803>
- Théron, O., Duru, M., Roger-Estrade, J., & Richard, G. (2017). A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities. A review. *Agronomy for sustainable development*, 37(3), 21. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0429-7>
- Théron, O., Tichit, M., Tibi, A., Accatino, F., Biju-Duval, L., Bockstaller, C., Bohan, D., Bonaudo, T., Boval, M., Cahuzac, E., Casellas, E., Chauvel, B., Choler, P., Constantin, J., Cousin, I., Daroussin, J., David, M., Delacote, P., Derocles, S., ... Tardieu, L. (2017). *Volet “écosystèmes agricoles” de l’Evaluation Française des Ecosystèmes et des Services Ecosystémiques* (p. 966 p.) [Report, INRA]. <https://doi.org/10.15454/prmv-wc85>
- Triplet, P. (2020). *Dictionnaire encyclopédique de la diversité biologique et de la conservation de la nature, 6e édition*.
- Tscharntke, T., Grass, I., Wanger, T. C., Westphal, C., & Batáry, P. (2021). Beyond organic farming – harnessing biodiversity-friendly landscapes. *Trends in Ecology & Evolution*, 36(10), 919–930. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.010>
- Uyttenbroeck, R., Piqueray, J., Hatt, S., Mahy, G., & Monty, A. (2017). Increasing plant functional diversity is not the key for supporting pollinators in wildflower strips. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 249, 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.014>
- Vaudo, A. D., Tooker, J. F., Grozinger, C. M., & Patch, H. M. (2015). Bee nutrition and floral resource restoration. *Current Opinion in Insect Science*, 10, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2015.05.008>
- Veen, P., Jefferson, R., Smidt, J. de, & Straaten, J. van der. (2014). *Grasslands in Europe: of high nature value*. KNNV Publishing. <https://brill.com/view/title/25573>
- Vereecken, N. (2017). *Découvrir et protéger nos abeilles sauvages*. Glénat. <https://livre.fnac.com/a10295106/Nicolas-Vereecken-Decouvrir-et-protoger-nos-abeilles-sauvages>
- Violle, C., Navas, M.-L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116(5), 882–892. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x>

- Wenzel, A., Grass, I., Belavadi, V. V., & Tschardt, T. (2020). How urbanization is driving pollinator diversity and pollination – A systematic review. *Biological Conservation*, 241, 108321. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108321>
- Westoby, M. (1998). A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme. *Plant and Soil*, 199(2), 213–227. <https://doi.org/10.1023/A:1004327224729>
- Wilson, J. B., Peet, R. K., Dengler, J., & Pärtel, M. (2012). Plant species richness: The world records. *Journal of Vegetation Science*, 23(4), 796–802. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2012.01400.x>
- Woodcock, B. A., Edwards, M., Redhead, J., Meek, W. R., Nuttall, P., Falk, S., Nowakowski, M., & Pywell, R. F. (2013). Crop flower visitation by honeybees, bumblebees and solitary bees: Behavioural differences and diversity responses to landscape. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 171, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.03.005>
- Wright, I. J., Reich, P. B., Westoby, M., Ackerly, D. D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornelissen, J. H. C., Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P. K., Gulias, J., Hikosaka, K., Lamont, B. B., Lee, T., Lee, W., Lusk, C., ... Villar, R. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428(6985), 821–827. <https://doi.org/10.1038/nature02403>
- Zulian, G., Maes, J., & Paracchini, M. L. (2013). Linking Land Cover Data and Crop Yields for Mapping and Assessment of Pollination Services in Europe. *Land*, 2(3), 472–492. <https://doi.org/10.3390/land2030472>