



Vers une meilleure compréhension, hiérarchisation et gestion des facteurs biotiques et abiotiques affectant la phase d'implantation des cultures semées

Jay Ram Lamichhane

► To cite this version:

Jay Ram Lamichhane. Vers une meilleure compréhension, hiérarchisation et gestion des facteurs biotiques et abiotiques affectant la phase d'implantation des cultures semées. Sciences du Vivant [q-bio]. Université de Toulouse. Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2021. tel-03764361

HAL Id: tel-03764361

<https://hal.inrae.fr/tel-03764361>

Submitted on 30 Aug 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.

Mémoire en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches



Université
de Toulouse

Université de Toulouse

Institut National Polytechnique de Toulouse

Vers une meilleure compréhension, hiérarchisation et gestion des facteurs biotiques et abiotiques affectant la phase d'implantation des cultures semées

Jay Ram Lamichhane

Chargé de Recherche

UMR 1248 AGIR, INRAE Occitanie-Toulouse, 31326 Castanet Tolosan

Le mardi, 23 novembre 2021, à Toulouse, devant le jury composé de

Jean-Noël AUBERTOT	Directeur de recherche INRAE	Examineur-Référent HDR
Odile CARISSE	Chercheuse Agriculture et Agroalimentaire Canada	Rapporteuse
Nathalie COLBACH	Directrice de recherche INRAE	Rapporteuse
Guy RICHARD	Directeur de recherche INRAE	Examineur
Jean ROGER-ESTRADE	Professeur AgroParisTech	Rapporteur
Christian STEINBERG	Directeur de recherche INRAE	Examineur

Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent à Jean-Noël Aubertot pour ses grandes qualités humaines et professionnelles, et pour tout le soutien qu'il m'a apporté à chaque fois que je l'ai sollicité ! Merci Jean-Noël pour ton aide pour améliorer mon français, pour m'avoir appris l'importance des modèles conceptuels, dont il est vrai que je ne cernais pas bien l'utilité à mon arrivée dans l'équipe ; tes relectures attentives et avisées pour améliorer la qualité de mes rapports et de mes mémoires rédigés en français, y compris ce mémoire de HDR ! Je t'exprime ma plus profonde gratitude.

Je remercie Philippe Debaeke pour sa bienveillance et ses disponibilités à chaque fois que je l'ai sollicité, y compris pour la relecture de ce document.

Merci également à Lionel Alletto pour ses différents retours à chaque fois que je l'ai sollicité, et pour avoir relu ce document.

Merci à Jean-Pierre Sarthou pour les nombreuses discussions sur l'agronomie et, plus généralement, l'agriculture, surtout au début de mon arrivée à l'UMR. C'est aussi grâce à lui que j'ai pu améliorer mon français à chaque fois que je commettais des erreurs !

Un grand merci à Jean-Noël Aubertot, Odile Carisse, Nathalie Colbach, Guy Richard, Jean Roger-Estrade et Christian Steinberg qui m'ont fait l'honneur d'accepter de participer à mon jury, et d'évaluer et discuter mon travail. Je sais combien leur temps est précieux et je leur en suis d'autant plus reconnaissant.

Un grand merci à Antoine Messéan avec qui j'ai eu la chance de travailler dans le passé ! J'ai beaucoup appris à ses côtés. Cela a été un honneur pour moi de travailler avec lui !

Je suis reconnaissant à tous ceux qui ont contribué à me faire progresser tout au long de mon parcours. Mon chemin a commencé à partir d'un village agricole reculé du Népal, il a continué dans différents pays, me faisant rencontrer une belle diversité de personnes et de lieux, avant de me conduire dans la ville rose ! La liste des personnes qui ont contribué à ma formation serait trop longue à mentionner ici. Je souhaite simplement remercier ici tous ceux qui m'ont beaucoup appris, tant du point de vue humain que professionnel.

Ce mémoire est le mien, mais toutes les recherches que j'ai menées l'ont été de manière collective. Sans ces interactions fortes au sein de différents groupes et réseaux, il n'aurait pas été possible d'accomplir les travaux présentés ici. Merci en particulier à tous les stagiaires et doctorants que j'ai encadrés ou co-encadrés au fil des ans car ils ont largement contribué à ce travail. Un remerciement particulier aux techniciens de l'équipe VASCO – Damien, Béatrice, Pierre, Eric, Benoît, Sophie et Jean-Francois - pour leur soutien technique incessant sans lequel je n'aurais pas pu bien mener mon travail.

Je remercie aussi tous les collègues de l'équipe VASCO et de l'UMR AGIR, ainsi que les collègues avec qui j'ai eu l'occasion d'interagir au fil des années, que ce soit au niveau national ou international, pour les nombreux échanges qui m'ont permis d'enrichir ma vision de la recherche.

Je remercie également l'équipe informatique de l'UMR, ainsi que les gestionnaires de l'UMR AGIR pour m'avoir permis de réaliser mon travail dans de bonnes conditions.

Enfin, je remercie mes amis et ma famille : mes parents, mes sœurs et mon frère, qui ont tous joué un rôle dans ma vie, et donc dans le déroulement de ma carrière. Un remerciement spécial à Binda, Himal et Tara qui me donnent tous les jours ma dose d'énergie positive pour avancer sereinement.

Préambule

Pourquoi passer mon HDR à ce moment de ma carrière ?

Je viens d'un petit village reculé du Népal et rien ne me prédestinait à travailler en tant que chercheur à INRAE. Né dans une famille dont les parents sont analphabètes, les études étaient pour moi un rêve quasiment inaccessible ! Le chemin depuis ce village du Népal jusqu'à mon atterrissage dans la ville rose a été long et sinueux, mais je suis là ! Heureux, optimiste et motivé, comme on m'a appris à l'être pendant mon enfance. Je crois que si j'en suis arrivé là, cela signifie qu'avec de la bonne volonté, beaucoup de travail, et un peu de chance, il existe des opportunités pour les personnes d'origines modestes. C'est l'une des richesses que j'apprécie en France, et à INRAE en particulier.

Après avoir quitté le foyer familial à l'âge de 13 ans et malgré mon très mauvais parcours scolaire, j'ai pu combler la plupart de mes lacunes pendant mes études de licence et de master en Italie, même s'il me reste beaucoup à apprendre. C'est pendant mes études de premier et deuxième cycles universitaires que j'ai commencé à prendre conscience de la valeur de l'éducation, de la connaissance, et de leur importance pour moi et pour mes enfants. J'ai alors trouvé ma voie : apporter une contribution à la science, tout en continuant à progresser, et à améliorer mon bagage culturel. C'est ce qui m'a poussé à réaliser un travail doctoral. L'expertise que j'ai développée au cours des 15 dernières années dans différentes disciplines, mon réseau national et international, différents travaux collégiaux publiés sous forme de *position papers*, méta-analyses et synthèses bibliographiques sont le socle de mes futurs travaux de recherche. Après ma formation initiale en agronomie, une spécialisation en phytopathologie, et l'expérience acquise dans l'animation scientifique et la coordination de la recherche au cours de mon troisième contrat post-doctoral, j'ai retrouvé une activité de recherche *sensu stricto* sur une thématique passionnante : L'analyse et la modélisation des facteurs abiotiques et biotiques affectant la qualité d'implantation des cultures semées. Je crois que ma passion pour ce sujet vient du fait qu'il se trouve à l'interface entre différentes disciplines et qu'il nécessite une large gamme d'approches pour être traité efficacement.

Même si passer une HDR quatre ans seulement après mon recrutement peut sembler précoce, je pense que le moment est venu pour moi de me projeter vers la formation de jeunes chercheurs via l'encadrement de thèses. Ceci est d'autant plus vrai que je suis de plus en plus impliqué dans des projets de recherche collectifs sur différentes grandes cultures. Ceci nécessite de conduire différentes expériences au champ et au laboratoire pour générer des connaissances primaires, et de mettre au point de nouvelles méthodes et de nouveaux outils. Ces activités requièrent un travail collectif mobilisant chercheurs, ingénieurs, techniciens, et plusieurs doctorants. Sur un plan plus administratif, la CSS, lors de l'évaluation individuelle de mes activités de recherche en 2020, m'a encouragé à passer mon HDR dès que possible. Ceci m'a conforté dans mon choix de réaliser cet exercice spécifique à la France pour un chercheur d'origines étrangères comme moi. Outre le fait de pouvoir encadrer et contribuer à la formation de doctorants, une HDR est un symbole d'intégration à la communauté scientifique française à laquelle je suis fier d'appartenir.

J'utilise la première personne tout au long du rapport car ce dossier est personnel. Néanmoins, j'ai développé toutes mes recherches de manière collective. Pour plus de précisions, il est possible de se référer à la liste des publications et aux noms des co-auteurs.

Liste des abreviations

ABSV	AgroBioSciences Végétales
ACL	Articles dans des revues Internationales à comité de lecture
ADN	Acide DésoxyriboNucléique
A-AGD	Agroecology - Agriculture Green Development
AGIR	AGroécologies, Innovations & teRritoires
AGREST	AGRoEcologie du Système de production au Territoire
ANR	Agence Nationale de la Recherche
ARS	Agenda de recherche stratégique
CASDAR	Compte d'Affectation Spécial au Développement Agricole et Rural
CAU	China Agricultural University
CESIM	Crop Establishment SIMulator
CIMS	Cultures Intermédiaires MultiServices
C-IPM	Coordinated Integrated Pest Management
CNL	Causes de Non-Levée
COM	Communications dans des conférences
CRCN	Chargé de Recherches de Classe Normale
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organaization
CSS	Commission Scientifique Spécialisée
CU	Chapitres d'ouvrage
DE	Disservices Ecosystémiques
DEPHY-EXPE	Démonstration, Expérimentation et Production de références sur des systèmes de culture économes en produits pHYtosanitaires par EXPErimentation
ENDURE	European Network for DURable Exploitation of crop protection strategies
ENSAIA	École Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires
ENSAT	École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse
ERA-Net	European Research Area Network
EVA	Ecophysiologie Végétale et Agronomie
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
IAM	Institut Agronomique Méditerranéen
IFT	Indice de Fréquence de Traitement
INPT	Institut National Polytechnique de Toulouse
INRAE	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement
IRHS	Institut de Recherche en Horticulture et Semences
ISARA	Institut supérieur d'agriculture Rhône-Alpes
LIPME	Laboratoire des Interactions Plantes-Microbes-Environnement
MERCI	Méthode d'Estimation des Restitutions par les Cultures Intermédiaires

MMR	MisMatch Repair
OAD	Outil d'Aide à la Décision
PACTOLE	Pour une AgriCulTure diversifiée valorisant les Oléagineux et les LEgumineuses à graines.
PAEC	Protection agroécologique des cultures
PIC	Protection Intégrée des Cultures
PSPC	Projets Structurants Pour la Compétitivité
RCP	Representative Concentration Pathway
SDC	systèmes de cultures
SE	Services Ecosystémiques
SIMPLE	SIMulation of Plant Emergence
SLU	Swedish University of Agricultural Sciences
STICS	Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard
STPC	Semences Traitées avec des Pesticides Chimiques
TWB	Toulouse White Biotechnology
UE	Unione Europea
UMR	Unité Mixte de Recherche
UMT	Unité Mixte Technologique
VASCO	VARIétés et Systèmes de Culture pour une production agrO-écologique

Sommaire

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	2
PREAMBULE	3
LISTE DES ABREVIATIONS	4
CHAPITRE I : PRESENTATION DU CANDIDAT	7
1. Curriculum vitae	7
2. Liste des publications.....	11
CHAPITRE II : BILAN DES ACTIVITES SCIENTIFIQUES	23
1. Synthèse de mes travaux de recherche pre-recrutement.....	23
2. Synthèse de mes travaux de recherche post-recrutement.....	41
CHAPITRE III : PROJET SCIENTIFIQUE	60
1. Enjeux agronomiques et scientifiques	60
2. Axe I : analyse des effets de pratiques agroécologiques innovantes sur la qualité d'implantation des cultures semées	61
3. Axe II : protection agroécologique des cultures et biocontrôle pendant la phase d'implantation ..	73
4. Méthodes et approches pour réaliser mon projet de recherche.....	77
5. Organisations et collaborations pour réaliser mon projet de recherche.....	78
CHAPITRE IV. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	82

CHAPITRE I : PRESENTATION DU CANDIDAT

1. CURRICULUM VITAE

Jay Ram Lamichhane
42 ans, né le 23 Avril 1979, 2 enfants
Quotité de travail : 100%

Diplômes et Expérience professionnelle

09 / 2017..... **CRCN, INRAE, UMR AGIR équipe VASCO**

Thématiques : Analyse et modélisation des déterminants biotiques et abiotiques de la levée des cultures semées.

04 / 2014 – 09 / 2017 **Chercheur post-doctoral (Scientific officer), INRA, Unité Eco-Innov, Thiverval-Grignon, France**

Thématiques : Co-animation du réseau européen ERA-Net en Protection Intégrée des Cultures (PIC) C-IPM (<http://c-ipm.org/>) et du Groupe de Recherche Européen ENDURE (<http://www.endure-network.eu/fr>)

Responsable : Antoine Messéan

01 / 2013 - 03 / 2014 **Chercheur post-doctoral, INRA, Unité de recherche en Pathologie Végétale Avignon, France**

Thématiques : Détermination de la gamme d'hôtes du complexe d'espèces phytopathogènes *Pseudomonas syringae*.

Responsable Scientifique : Cindy E. Morris

01/2011 - 01 / 2013 **Chercheur post-doctoral, Département de Protection des Végétaux, Université de la Tuscia, Viterbe, Italie**

Thématiques : Étude épidémiologique des maladies du noisetier (fongiques et bactériennes) en Italie centrale

Responsable Scientifique : Leonardo Varvaro

05 / 2011 - 12 / 2011 **Assistant de recherche, Département de Protection des Végétaux, Université de la Tuscia, Viterbe, Italie**

Thématiques : Contrôle biologique des bactéries pathogènes des plantes, des champignons et des oomycètes par antagonisme bactérien

Responsable Scientifique : Andrea Vannini

01 / 2011 - 04 / 2011 **Chercheur invité dans un projet de la FAO** dans le cadre d'une collaboration entre Direction de la protection des végétaux (Katmandou, Népal) et l'Université de la Tuscia (Viterbe, Italie),

Thématiques : Formation d'agriculteurs, de fonctionnaires et de techniciens sur l'oléiculture et la PIC.

09 / 2007 - 12 / 2010 **Doctorat en phytopathologie**. Collaboration entre l'Université de la Tuscia et le Centre de Recherche Horticole de Katmandou, Népal (mention excellente).

Titre de la thèse : Études phyto-bactériologiques liées à l'olivier indigène (*Olea cuspidata* Wall.) et introduit (*Olea europaea* L.) au Népal. **Encadrant** : Leonardo Varvaro

09 / 2005 - 08 / 2007 **Master en Agronomie**, Université de la Tuscia, Viterbe, Italie (*Cum Laude*).

Titre du mémoire : Nouvelles ressources génétiques du pois chiche (*Cicer arietinum* L.) pour les semis en hiver.

Encadrant : Francesco Saccardo

09 / 2002 - 08 / 2005 **Licence en Agronomie**, Université de la Tuscia, Viterbe, Italie (*Cum Laude*).

Titre du mémoire : Caractérisation morpho-physiologique de lignées de pois chiche (*Cicer arietinum* L) pour les semis en hiver.

Encadrant : Francesco Saccardo

Encadrement scientifique

Co-encadrement de trois thèses :

- Alexandre Wojciechowski (2021-2024) ; Etude des effets abiotiques et biotiques de cultures intermédiaires multiservices (CIMS) sur l'implantation et la productivité d'une culture de maïs à popcorn ; taux d'encadrement : 50% (directeur de thèse : Lionel Alletto, INRAE) ; Doctorat en Agroécologie ; **Publications** : **Premier papier d'une méta-analyse en préparation.**
- Ebrahim Osdaghi (2014-2018) ; Phylogénie, génétique des populations et pathogénicité de *Curtobacterium flaccumfaciens*, l'agent causal de flétrissement bactérien, en Iran ; taux d'encadrement : 50% (directeur de thèse : S. Mohsen Taghavi, Université de Shiraz, Iran) ; Doctorat en phytopathologie ; **Publications** : **ACLS26, ACL27, ACL 28, ACL37, ACL41, ACL44, ACL49 dans la liste.**
- Emna Abdellatif (2015-2017) ; Caractérisation phénotypique et génétique des souches de *Pseudomonas syringae* associées aux récentes épidémies de pyriculariose bactérienne des agrumes en Tunisie ; taux d'encadrement : 25% (directeur de thèse : Ali Rouma, Institut de l'Olivier, Tunisie) ; Doctorat en phytopathologie ; **Publications** : **ACLS36 dans la liste.**

Encadrement de stages de fin d'études de master ou d'ingénieur (Seuls les travaux d'encadrement postérieurs à mon recrutement sont listés)

- Imen Ben Hamouda (2021) – IAM, Montpellier – Agriculture numérique ; taux d'encadrement : 100%.
- Lucas Soerensen (2021) – ENSAT, Toulouse - Agroécologie et Protection agroécologie et protection des cultures ; taux d'encadrement : 100%.
- Clémentine Bourgeois (2021) – ENSAT, Toulouse - Agroécologie et Protection agroécologie et protection des cultures ; taux d'encadrement : 100%.
- Alexandre Wojciechowski (2020) - ESA, Angers - Agroécologie et Protection agroécologie et protection des cultures ; taux d'encadrement : 100%.
- Dora Bitba (2020), - ISARA, Lyon - Agroécologie et Protection agroécologie et protection des cultures ; taux d'encadrement : 100%.
- Ndoumbé Mbaye (2019), - ENSAIA, Nancy - Agroécologie et Protection agroécologie et protection des cultures ; taux d'encadrement : 100%.

Participation à un jury de thèse

- Vou M. Shutt (2015-2017), Université de Pretoria, Afrique du Sud ; Les pathogènes bactériens de la tomate en Afrique du Sud : identification, diversité de la population et susceptibilités des cultivars". Directrice de thèse : Prof. Teresa A. Coutinho.

Enseignement

- ENSAT – Agrobiosciences Végétales (ABSV) et "AGRoEcologie du Système de production au Territoire (AGREST)" (0.5 j/an) : interactions génotype x environnement x conduite
- SLU, Suède - Doctorat : Protection intégrée évolutive contre les bioagresseurs (0.5 j/an).

Responsabilités éditoriales et organisation de manifestations d'ordre scientifique

- Editeur-en-Chef de la revue internationale Crop protection (2020 Impact Factor : 2.54), publiée par Elsevier (<https://www.journals.elsevier.com/crop-protection/editorial-board/j-r-lamichhane>)
- Relecteur régulier pour un ensemble de revues internationales incluant notamment Agronomy for Sustainable Development, European Journal of Plant Pathology, European Journal of Agronomy, Phytopathology, Plant Disease, Plant Pathology et PLoS ONE, Frontiers in Microbiology, Plant and Soil, Phytobiomes, Field Crops Research.

Liste des projets et responsabilités associées

- Projet de jumelage, CSIRO-INRAE -- Redesigning farming systems to reduce chemical reliance: Ecophyto meets HalveChem – Participant – 6 k€ -- 2021.
- Plant2Pro CIMS-ON -- Phénotypage de variétés de cultures intermédiaires en interculture longue pour une complémentarité de services fournis au tournesol -- participant – 200 k€ -- 2021-2023.
- CASDAR IPHARD -- Idéotypage et PHénotypage pour l'Adaptation des variétés de soja et de tournesol à la culture en Relai ou en Dérobé -- participant -- 407 k€ -- 2020-2023).
- PSPC naturellement pop-corn -- participant – 1.02 M€ -- 2019-2024.
- Ecophyto DEPHY EXPE FAST -- Faisabilité et Evaluation de Systèmes de Cultures Economes en pesticides en l'Absence répétée de Semences Traitées – participant -- 830 k€ -- 2019-2024.
- SusCrop ERA-Net LegumeGap -- Increasing productivity and sustainability of European plant protein production by closing the grain legume yield gap – Participant – 161 k€ -- 2019-2022.

Projets déposés mais non financés

- ANR CJC MEMORA -- Modelling temperature stress MemOry in oilseed Rape – participant – 2020.
- ANR MILPA -- Development of an innovative bio-assay characterizing key drivers of corn and common bean damping-off to implement biocontrol seed treatments – Participant – 2020.
- A-AGD -- Agroecology - Agriculture Green Development – Coordinateur -- 2019.

Collaborations en cours ayant donné, donnant ou qui donneront lieu à publications (seuls les collaborations postérieures à mon recrutement sont listées)

- Australie : CSIRO (Sharon Downes et Peter Hunt) et Université de Perth (Martin Barbetti)
- Iran : Université de Tehran (Elias Soltani, Ebrahim Osdaghi)
- USA : Université de Floride (Bhim Chaulagain et Jeff Jones), Université de Oregon (Dipak Sharma-Poudyal), Université de Michigan (Martin Chilvers)
- France : Christien Steinberg (UMR Agroécologie, Dijon), Matthieu Barret (IRHS, Angers), Christophe Bailly (Institut de Biologie, Paris Seine), Sophie Brunel-Muguet (UMR EVA, Caen), Nicolas Langlade (UMR LIPME), Christophe Sausse et Céline Schoving (Terres Inovia), Lionel Alletto, Jean-Noël Aubertot, Julie Constantin, Célia Seassau, Marie-Hélène Robin, Philippe Debaeke, Pierre Maury (UMR AGIR).

Tableau 1. Récapitulatif du nombre d'articles scientifiques cosignés avec des collègues en fonction des régions géographiques jusqu'au 31 août 2021. PIC : Protection Intégrée des Cultures ; ACL : Articles dans des revues Internationales à comité de lecture.

Continent	Pays	Numéro d'ACL				
		Phytopathologie	Ecologie microbienne	PIC	Science du sol	Implantation
Asie	<i>Iran</i>	10	-	-	-	1
	<i>Chine</i>	-	-	-	-	1
	<i>Népal</i>	4	1	-	-	-
Afrique	<i>Tunisie</i>	1	-	-	-	-
Europe	<i>Allemagne</i>	-	-	7	-	-
	<i>Danemark</i>	-	-	10	-	-
	<i>France</i>	5	3	11	1	12
	<i>Hongrie</i>	-	-	5	-	-
	<i>Italie</i>	18	3	4	-	-
	<i>Pays bas</i>	-	-	5	-	-
	<i>Royaume Uni</i>	-	-	3	-	-
	<i>Spain</i>	-	-	1	-	-
	<i>Suisse</i>	1	-	-	-	-
Amérique du Nord	<i>États-Unis</i>	1	1	3	-	-
Amérique du Sud	<i>Brésil</i>	-	-	1	-	-
	<i>Chili</i>	-	-	1	-	-
Océanie	<i>Australie</i>	1	-	-	-	4

2. LISTE DES PUBLICATIONS

Article dans des revues Internationales à comité de lecture

1. **Jay Ram Lamichhane** (2021). Editorial: Impact assessment, ecology and management of animal pests affecting field crop establishment: An introduction to the special issue. Crop protection. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.CROPRO.2021.105779](https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105779)
2. Olivier Husson, Jean Pierre Sarthou, Lydia Bousset, Alain Ratnadass, Hans-Peter Schmidt, John Kempf, Benoit Husson, Sophie Tingry, Jean-Noël Aubertot, Jean-Philippe Deguine, François-Régis Goebel, **Jay Ram Lamichhane** (2021). Eh and pH homeostasis as a major driver of soil and plant health: A review. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/S11104-021-05047-Z](https://doi.org/10.1007/S11104-021-05047-Z)
3. Fan Fan, Wopke van der Werf, **Jay Ram Lamichhane**, Wenfeng Huang, Chunjie Li, Chaochun Zhang, Wenfeng Cong, Fusuo Zhang (2021). Cover crops promote primary crop yield in China: a meta-regression of factors affecting yield gain. Field Crops Research. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108237>
4. **Jay Ram Lamichhane**. Rising risks of late-spring frosts in a changing climate. Nature Climate Change (2021), 11 (7), pp.554-555. [HTTPS://DOI.ORG/10.1038/S41558-021-01090-X](https://doi.org/10.1038/S41558-021-01090-X)

5. **Jay Ram Lamichhane** (2021). Post-emergence seedling damage due to vertebrate pests and its impact on soybean establishment. *PeerJ* 9:e11106 [HTTPS://DOI.ORG/10.7717/PEERJ.11106](https://doi.org/10.7717/PEERJ.11106)
6. **Jay Ram Lamichhane** and Jean-Noël Aubertot (2021). Effect of early and conventional sowings on soybean establishment quality, nodulation and early biomass development under inoculation with *Rhizoctonia solani*. *PhytoFrontiers*. <https://doi.org/10.1094/PHYTOFR-12-20-0046-R>
7. **Jay Ram Lamichhane**, Jean Boiffin, Hubert Boizard, Carolynne Durr, and Guy Richard (2021). Seedbed structure of major field crops as affected by cropping systems and climate: Results of a 15-year field trial. *Soil and Tillage Research*, 206:10p., February. doi: 10.1016/j.still.2020.104845. <https://hal.inrae.fr/hal-03012868>.
8. **Jay Ram Lamichhane** and Francis PF. Reay-Jones (2021). Editorial: Impacts of COVID-19 on global plant health and crop protection and the resulting effect on global food security and safety. *Crop Protection*, 139:105383, January. doi: 10.1016/j.cropro.2020.105383. <https://hal.inrae.fr/hal-02937475>.
9. **Jay Ram Lamichhane** and Veronique Laudinot (2021). Unveiling the unknown: knowledge and risk perception about the planting of pesticide-treated seed among French arable farmers. *Journal of Plant Diseases and Protection*, November. doi: 10.1007/s41348-020-00400-3. <https://hal.inrae.fr/hal-03025644>.
10. Martin John Barbetti, Tanveer N., Ian Pritchard, **Jay Ram Lamichhane**, Jean-Noël Aubertot, David Camilo Corrales Munoz, and Ming Pei You (2021). Challenges with Managing Disease Complexes during Application of Different Measures Against Foliar Diseases of Field Pea. *Plant Disease*, page 30 p., September. <https://hal.inrae.fr/hal-02937483>.
11. Elana Dayoub, **Jay Ram Lamichhane**, Céline Schoving, Philippe Debaeke, Pierre Maury. Early-Stage Phenotyping of Root Traits Provides Insights into the Drought Tolerance Level of Soybean Cultivars *Agronomy*, MDPI, 2021, 11 (1), pp.188. <10.3390/agronomy11010188>
12. **Jay Ram Lamichhane** (2020). Parsimonious Use of Pesticide-Treated Seeds: An Integrated Pest Management Framework. *Trends in Plant Science*, 25(11):1070-1073, November. doi: 10.1016/j.tplants.2020.08.002. <https://hal.inrae.fr/hal-03001401>.
13. **Jay Ram Lamichhane**, Jean-Noël Aubertot, Luc Champolivier, Philippe Debaeke, and Pierre Maury (2020a). Combining Experimental and Modeling Approaches to Understand Genotype x Sowing Date x Environment Interaction Effects on Emergence Rates and Grain Yield of Soybean. *Frontiers in Plant Science*, 11:17p., September. doi: 10.3389/fpls.2020.558855. <https://hal.inrae.fr/hal-02937487>.
14. **Jay Ram Lamichhane**, Ming Pei You, Martin John Barbetti, and Jean-Noel J.-N. Aubertot (2020b). Crop Establishment SIMulator: a qualitative aggregative model to predict the role of phytobiomes on field crop establishment. *Phytobiomes Journal*, 4(4):327-339, July. doi: 10.1094/PBIOMES-05-20-0036-R. <https://hal.inrae.fr/hal-02912499>.
15. Ming Pei You, **Jay Ram Lamichhane**, Jean-Noel J.-N. Aubertot, and Martin Barbetti (2020). Understanding Why Effective Fungicides Against Individual Soilborne Pathogens Are Ineffective with Soilborne Pathogen Complexes. *Plant Disease*, 104(3):904-920, March. doi:

10.1094/PDIS-06-19-1252-RE. <https://hal.inrae.fr/hal-02875078>.

16. **Jay Ram Lamichhane**, Ming Pei You, Véronique Laudinot, Martin Barbetti, and Jean-Noel J.-N. Aubertot (2020c). Revisiting Sustainability of Fungicide Seed Treatments for Field Crops. *Plant Disease*, 104(3):610-623, March. doi: 10.1094/PDIS-06-19-1157-FE. <https://hal.inrae.fr/hal-02875077>.
17. **Jay Ram Lamichhane** (2020b). Editorial -Crop health in agroforestry systems: An introduction to the special issue. *Crop Protection*, 134, February. doi: 10.1016/j.cropro.2020.105187. <https://hal.inrae.fr/hal-02912503>.
18. **Jay Ram Lamichhane**, Julie Constantin, Céline Schoving, Pierre Maury, Philippe Debaeke, Jean-Noel Aubertot, and Carolyne Durr (2020d). Analysis of soybean germination, emergence, and prediction of a possible northward establishment of the crop under climate change. *European Journal of Agronomy*, 113:125972. doi: 10.1016/j.eja.2019.125972. <https://hal.inrae.fr/hal-02622769>.
19. **Jay Ram Lamichhane**, Antoine Messean, and Pierre Ricci (2019a). Research and innovation priorities as defined by the Ecophyto plan to address current crop protection transformation challenges in France. In *Advances in Agronomy*, volume 154 of *Advances in Agronomy*, page 296 p.. doi: 10.1016/bs.agron.2018.11.003. <https://hal.inrae.fr/hal-02789386>.
20. **Jay Ram Lamichhane**, Julie Constantin, Jean-Noel Aubertot, and Carolyne Durr (2019b). Will climate change affect sugar beet establishment of the 21st century? Insights from a simulation study using a crop emergence model. *Field Crops Research*, 238:64-73. doi: 10.1016/j.fcr.2019.04.022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02167526>.
21. **Jay Ram Lamichhane**, Julie Constantin, Céline Schoving, Pierre Maury, Philippe Debaeke, Jean-Noël Aubertot, and Carolyne Durr (2019c). Analysis of soybean germination, emergence, and prediction of a possible northward expansion of the crop under climate change. *European Journal of Agronomy*, 113:125972,. doi: 10.1101/632976. <https://hal.inrae.fr/hal-02624825>.
22. Cindy E. Morris, **Jay Ram Lamichhane**, Ivan Nikolic, Slavisa Stankovic, and Benoit Moury (2019). The overlapping continuum of host range among strains in the *Pseudomonas syringae* complex. *Phytopathology Research*, 1:4:16 p. doi: 10.1186/s42483-018-0010-6. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02621367>.
23. **Jay Ram Lamichhane**, Ebrahim Osdaghi, Franklin Behlau, Jurgen Kohl, Jeffrey B. Jones, and Jean-Noël Aubertot (2018a). Thirteen decades of antimicrobial copper compounds applied in agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(3):28,. doi: 10.1007/s13593-018-0503-9. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02140099>.
24. **Jay Ram Lamichhane**, Philippe Debaeke, Christian Steinberg, Ming Pei You, Martin J. Barbetti, and Jean-Noel Aubertot (2018b). Abiotic and biotic factors affecting crop seed germination and seedling emergence: a conceptual framework. *Plant and Soil*, 432(1-2):1-28,. doi: 10.1007/s11104-018-3780-9. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02627997>.
25. Sina Zarei, Seyed Mohsen Taghavi, Habiballah Hamzehzarghani, Ebrahim Osdaghi, and **Jay Ram Lamichhane** (2018). Epiphytic growth of *Xanthomonas arboricola* and *Xanthomonas citri*

- on non-host plants. *Plant Pathology*, 67(3):660-670,. doi: 10.1111/ppa.12769. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02627038>.
26. Ebrahim Osdaghi, Seyed Mohsen Taghavi, Ralf Koebnik, and **Jay Ram Lamichhane** (2018a). Multilocus sequence analysis reveals a novel phylogroup of *Xanthomonas euvesicatoria* pv. *perforans* causing bacterial spot of tomato in Iran. *Plant Pathology*, 67(7):1601-1611,. doi: 10.1111/ppa.12864. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02621197>.
 27. Ebrahim Osdaghi, Muhammad Sajjad Ansari, Seyed Mohsen Taghavi, Sina Zarei, Ralph Koebnik, and **Jay Ram Lamichhane** (2018b). Pathogenicity and phylogenetic analysis of *Clavibacter michiganensis* strains associated with tomato plants in Iran. *Plant Pathology*, 67(4):957-970,. doi: 10.1111/ppa.12801. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02623769>.
 28. E. Osdaghi, S. M. Taghavi, H. Hamzehzarghani, A. Fazliarab, R. M. Harveson, S. Tegli, and **Jay Ram Lamichhane** (2018c). Epiphytic *Curtobacterium accumfaciens* strains isolated from symptomless solanaceous vegetables are pathogenic on leguminous but not on solanaceous plants. *Plant Pathology*, 67 (2):388-398,. doi: 10.1111/ppa.12730. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02624607>.
 29. Zohreh Yaripour, Seyed Mohsen Taghavi, Ebrahim Osdaghi, and **Jay Ram Lamichhane** (2018). Host range and phylogenetic analysis of *Xanthomonas alfalfae* causing bacterial leaf spot of alfalfa in Iran. *European Journal of Plant Pathology*, 150(1):267-274,. doi: 10.1007/s10658-017-1271-0. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02621396>.
 30. **Jay Ram Lamichhane**, Birol Akbas, Claus Bo Andreasen, Wilma Arendse, Sylvia Bluemel, Silke Dachbrodt-Saaydeh, Annika Fuchs, Jean-Pierre Jansen, Jozsef Kiss, Per Kudsk, Jean-Claude Malet, Alberto Masci, Anabel de la Pena, Astrid S.T. Willener, and Antoine Messean (2018c). A call for stakeholders to boost integrated pest management in Europe: a vision based on the three-year European research area network project. *International Journal of Pest Management*, Online:7 p.,. doi: 10.1080/09670874.2018.1435924. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02623756>.
 31. **Jay Ram Lamichhane**, Edward Arseniuk, Piet Boonekamp, Jerzy Czembor, Veronique Decroocq, Jerome Enjalbert, Maria R Finckh, Malgorzata Korbin, Mati Koppel, Per Kudsk, Danuta Sosnowska, Ewa Zimnoch-Guzowska, and Antoine Messean (2018d). Advocating a need for suitable breeding approaches to boost Integrated Pest Management: A European perspective. *Pest Management Science*, 74(6): 1219-1227,. doi: 10.1002/ps.4818. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02624556>.
 32. **Jay Ram Lamichhane**, Carolyne Durr, André A. Schwanck, Marie-Hélène Robin, Jean-Pierre Sarthou, Vincent Cellier, Antoine Messean, and Jean-Noel Aubertot (2017a). Integrated management of damping-off diseases. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(2):25 p.,. doi: 10.1007/s13593-017-0417-y. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01606538>.
 33. **Jay Ram Lamichhane**, Monika Bischoff-Schaefer, Sylvia Bluemel, Silke Dachbrodt-Saaydeh, Laure Dreux, Jean-Pierre Jansen, Jozsef Kiss, Jurgen Kohl, Per Kudsk, Thibaut Malausa, Antoine A. Messean, Philippe C. Nicot, Pierre Ricci, Jérôme Thibierge, and François Villeneuve (2017b). Identifying obstacles and ranking common biological control research priorities for Europe to manage most economically important pests in arable, vegetable and perennial crops.

Pest Management Science, 73(1):14-21,. doi: 10.1002/ps.4423. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02625012>.

34. **Jay Ram Lamichhane** (2017). Pesticide use and risk reduction in European farming systems with IPM: an introduction to the special issue. Crop Protection, 97:1-6,. doi: 10.1016/j.cropro.2017.01.017. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01608016>.
35. Bhim Chaulagain, Gopal Bahadur Khatri Chhetri, Sundar Man Shrestha, Sarala Sharma, Dipak Sharma-Poudyal, and **Jay Ram Lamichhane** (2017). Effect of two-component cultivar mixtures on development of wheat yellow rust disease in the field and greenhouse in the Nepal Himalayas. Journal of General Plant Pathology, 83(3):131-139,. doi: 10.1007/s10327-017-0705-z. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01605505>.
36. E Abdellatif, M Kaluzna, J D Janse, P Sobiczewski, F Helali, **Jay Ram Lamichhane**, and A Rhouma (2017). Phenotypic and genetic characterization of *Pseudomonas syringae* strains associated with the recent citrus-bacterial blast and bacterial black pit epidemics in Tunisia. Plant Pathology,. doi: 10.1111/ppa.12654. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02622084>.
37. E Osdaghi, Seyed Mohsen Taghavi, H Hamzehzarghani, A Fazliarab, and **Jay Ram Lamichhane** (2017). Monitoring the occurrence of tomato bacterial spot and range of the causal agent *Xanthomonas perforans* in Iran. Plant Pathology, 66(6):990-1002,. doi: 10.1111/ppa.12642. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02624363>.
38. **Jay Ram Lamichhane**, Y Devos, H J Beckie, M D K Owen, P Tillie, Antoine Messean, and P Kudsk (2017c). Integrated weed management systems with herbicide-tolerant crops in the European Union: lessons learnt from home and abroad. Critical Reviews in Biotechnology, 37(4):459-475,. doi: 10.1080/07388551.2016.1180588. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02626571>.
39. H Mafakheri, S M Taghavi, Z Banihashemi, E Osdaghi, and **Jay Ram Lamichhane** (2017). Pathogenicity, host range and phylogenetic position of *Agrobacterium* species associated with sugar beet crown gall outbreaks in Southern Iran. European Journal of Plant Pathology, 147(3),. doi: 10.1007/s10658-016-1034-3. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02625658>.
40. Martin Lechenet, Violaine Deytieux, Daniele Antichi, Jean-Noel Aubertot, Paolo Barberi, Michel Bertrand, Vincent Cellier, Raphael Charles, Caroline Colnenne-David, Silke Dachbrodt-Saaydeh, Philippe Debaeke, Thierry Doré, Pascal Farcy, Cesar Fernandez-Quintanilla, Gilles Grandeau, Cathy Hawes, Lionel Jouy, Eric Justes, Roman Kierzek, Per Kudsk, **Jay Ram Lamichhane**, Françoise Lescourret, Marco Mazzoncini, Bo Melander, Antoine Messean, Anna-Camilla Moonen, Adrian C. Newton, Jean Marie Nolot, Silvia Panozzo, Patrick Retaureau, Maurizio Sattin, Juergen Schwarz, Clotilde Toque, Vasileios P. Vasileiadis, and Nicolas Munier-Jolain (2017). Diversity of methodologies to experiment integrated pest management in arable cropping systems: analysis and reactions based on a European network. European Journal of Agronomy, 83:86-99,. doi: 10.1016/j.eja.2016.09.012. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01595530>.
41. Ebrahim Osdaghi, S. Mohsen Taghavi, Habiballah Hamzehzarghani, and **Jay Ram Lamichhane** (2016a). Occurrence and characterization of the bacterial spot pathogen *Xanthomonas euvesicatoria* on pepper in Iran. Journal of Phytopathology, 164(10):722-734,. doi: 10.1111/jph.12493. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02638098>.
42. **Jay Ram Lamichhane**, Claudia Bartoli, and Leonardo Varvaro (2016a). Extensive field survey,

laboratory and greenhouse studies reveal complex nature of *Pseudomonas syringae*-Associated hazelnut decline in central Italy. PLoS ONE, 11(2):1-15,. doi: 10.1371/journal.pone.0147584. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02629555>.

43. **Jay Ram Lamichhane**, Silke Dachbrodt-Saaydeh, Per Kudsk, and Antoine A. Messean (2016b). Toward a reduced reliance on conventional pesticides in European agriculture. Plant Disease, 100(1):10-24,. doi: 10.1094/PDIS-05-15-0574-FE. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02635303>.
44. Ebrahim Osdaghi, S. Mohsen Taghavi, Habiballah Hamzehzarghani, Amal Fazliarab, Robert M. Harveson, and **Jay Ram Lamichhane** (2016b). Occurrence and characterization of a new red-pigmented variant of *Curtobacterium accumfaciens*, the causal agent of bacterial wilt of edible dry beans in Iran. European Journal of Plant Pathology, 146(1):129 - 145,. doi: 10.1007/s10658-016-0900-3. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02635408>.
45. Claudia Bartoli, Fabrice Roux, and **Jay Ram Lamichhane** (2016). Molecular mechanisms underlying the emergence of bacterial pathogens: an ecological perspective. Molecular Plant Pathology, 17(1):303- 310,. doi: 10.1111/mpp.12284. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02637743>.
46. **Jay Ram Lamichhane**, Jean-Noel Aubertot, G Begg, A. Nick E. Birch, Piet Boonekamp, S Dachbrodt-Saaydeh, J G Hansen, M S Hovmoller, J E Jensen, L N Jorgensen, J Kiss, P Kudsk, A-C Moonen, Jean Yves Rasplus, M Sattin, Jean-Claude Streito, and Antoine Messean (2016c). Networking of integrated pest management : a powerful approach to address common challenges in agriculture. Crop Protection, 89:139-151,. doi: 10.1016/j.cropro.2016.07.011. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02639205>.
47. **Jay Ram Lamichhane** and Vittorio Venturi (2015). Synergisms between microbial pathogens in plant disease complexes: a growing trend. Frontiers in Plant Science, 6,. doi: 10.3389/fpls.2015.00385. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02636837>.
48. **Jay Ram Lamichhane**, Wilma Arendse, Silke Dachbrodt-Saaydeh, Per Kudsk, Johan C. Roman, Jose E. M. van Bijnsterveldt-Gels, Mario Wick, and Antoine A. Messean (2015a). Challenges and opportunities for integrated pest management in Europe: A telling example of minor uses. Crop Protection, 74:42-47,. doi: 10.1016/j.cropro.2015.04.005. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02638982>.
49. Ebrahim Osdaghi, Seyed Mohsen Taghavi, Amal Fazliarab, Elham Elahifard, and **Jay Ram Lamichhane** (2015). Characterization, geographic distribution and host range of *Curtobacterium accumfaciens*: An emerging bacterial pathogen in Iran. Crop Protection, 78:185-192,. doi: 10.1016/j.cropro.2015.09.015. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02637488>.
50. **Jay Ram Lamichhane** and Claudia Bartoli (2015). Plant pathogenic bacteria in open irrigation systems: what risk for crop health? Plant Pathology, 64(4):757-766,. doi: 10.1111/ppa.12371. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02640028>.
51. Claudia Bartoli, **Jay Ram Lamichhane**, Odile Berge, Leonardo Varvaro, and Cindy E Morris (2015a). Mutability in *Pseudomonas viridiava* as a programmed balance between antibiotic resistance and pathogenicity. Molecular Plant Pathology, 16(8):860-869,. doi: 10.1111/mpp.12243. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02633614>.
52. Claudia Bartoli, Sebastien Carrere, **Jay Ram Lamichhane**, Leonardo Varvaro, and Cindy E. Morris (2015b). Whole-genome sequencing of 10 *Pseudomonas syringae* strains representing

different host range spectra. *Genome Announcements*, 3(2):e00379-15,. doi: 10.1128/genomeA.00379-15. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02632911>.

53. **Jay Ram Lamichhane**, Antoine A. Messean, and Cindy E. Morris (2015b). Insights into epidemiology and control of diseases of annual plants caused by the *Pseudomonas syringae* species complex. *Journal of General Plant Pathology*, 81(5):331-350,. doi: 10.1007/s10327-015-0605-z. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02639244>.
54. Claudia Bartoli, **Jay Ram Lamichhane**, Odile Berge, Caroline Guilbaud, Leonardo Varvaro, Giorgio M. Balestra, Boris A. Vinatzer, and Cindy E. Morris (2015b). A framework to gauge the epidemic potential of plant pathogens in environmental reservoirs: the example of kiwifruit canker. *Molecular Plant Pathology*, 16(2):137 - 149,. doi: 10.1111/mpp.12167. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02637074>.
55. Marc Barzman, Paolo Barberi, A. Nick E. Birch, Piet Boonekamp, Silke Dachbrodt-Saaydeh, benno Graf, bernd Hommel, jens erik jensen, Jozsef Kiss, Per Kudsk, **Jay Ram Lamichhane**, Antoine Messean, Anna Camilla Moonen, Alain Ratnadass, Pierre Ricci, Jean-Louis Sarah, and Maurizio Sattin (2015). Eight principles of integrated pest management. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4). doi: 10.1007/s13593-015-0327-9. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01187039>.
56. **Jay Ram Lamichhane** (2015). Bacterial diseases of crops: elucidation of the factors that lead to differences between field and experimental Infections. In *Advances in agronomy*, volume 134 of *Advances in Agronomy*, page 262 p. Elsevier,. doi: 10.1016/bs.agron.2015.06.006. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02800058>.
57. **Jay Ram Lamichhane**, Leonardo Varvaro, Luciana L. Parisi, Jean Marc Audergon, and Cindy E. Morris (2014a). Disease and frost damage of woody plants caused by *Pseudomonas syringae*: Seeing the forest for the trees. *Advances in Agronomy*, 126:235-295,. doi: 10.1016/B978-0-12-800132-5.00004-3. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02638003>.
58. **Jay Ram Lamichhane** and Leonardo Varvaro (2014a). Olive knot pathogen with pronounced epiphytic lifestyle is not present in association to leaf surface of european olive across the himalayas in nepal. *Journal of Phytopathology*, 162(3):170-179,. doi: 10.1111/jph.12168. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02630623>.
59. **Jay Ram Lamichhane**, Alfredo Fabi, and Leonardo Varvaro (2014b). Summer heat and low soil organic matter inuence severity of hazelnut cytospora canker. *Phytopathology*, 104(4):387-395,. doi: 10.1094/PHYTO-05-13-0136-R. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02630747>.
60. **Jay Ram Lamichhane** and Leonardo Varvaro (2014b). Comparison of methods used in the recovery of Phylloplane bacteria: a case study of *Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi* applied to the Phylloplane of *Olea europaea* sub-species. *Journal of Plant Protection Research*, 54(1):22-27,. doi: 10.2478/jppr-2014-0004. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02629603>.
61. **Jay Ram Lamichhane** (2014). *Xanthomonas arboricola* diseases of stone fruit, almond, and walnut trees: Progress toward understanding and management. *Plant Disease*, 98(12):1600-1610,. doi: 10.1094/PDIS-08-14-0831-FE. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02639578>.

62. **Jay Ram Lamichhane** and Leonardo Varvaro (2014c). *Xanthomonas arboricola* disease of hazelnut: current status and future perspectives for its management. *Plant Pathology*, 63(2):243-254,. doi: 10.1111/ppa.12152. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02637459>.
63. **Jay Ram Lamichhane** and Leonardo Varvaro (2013a). Epiphytic *Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi* can infect and cause olive knot disease on *Olea europaea* subsp. *cuspidata*. *Australasian Plant Pathology*, 42 (2):219-225,. doi: 10.1007/s13313-012-0171-1. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02644498>.
64. **Jay Ram Lamichhane**, Alfredo Fabi, Roberto Ridolfi, and Leonardo Varvaro (2013). Epidemiological study of hazelnut bacterial blight in central Italy by using laboratory analysis and geostatistics. *PLoS ONE*, 8(2):14 p.,. doi: 10.1371/journal.pone.0056298. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02647839>.
65. **Jay Ram Lamichhane** and Leonardo Varvaro (2013b). A new medium for the detection of fluorescent pigment production by pseudomonads. *Plant Pathology*, 62(3):624-632,. doi: 10.1111/j.1365-3059.2012.02670.x. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02649980>.
66. **Jay Ram Lamichhane**, Pablo Grau, and Leonardo Varvaro (2012a). Emerging hazelnut cultivation and the severe threat of bacterial blight in Chile. *Journal of Phytopathology*, 160(11-12):752-754,. doi: 10.1111/jph.12004. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02650810>.
67. **Jay Ram Lamichhane**, Alfredo Fabi, and Leonardo Varvaro (2012b). Severe outbreak of bacterial blight caused by *Xanthomonas arboricola* pv. *corylina* on hazelnut cv. tonda di giffoni in central Italy. *Plant Disease*, 96(10):1577-1578,. doi: 10.1094/PDIS-04-12-0375-PDN. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02651058>.
68. Shambhu Paudel, Shant Ray Jnawali, and **Jay Ram Lamichhane** (2012). Use of geographic information system and direct survey methods to detect spatial distribution of wild olive (*Olea cuspidata* Wall.) from high mountain forests of north-western Nepal. *Journal of Sustainable Forestry*, 31(7):674-686,. doi: 10.1080/10549811.2012.704769. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02646325>.
69. Shambhu Paudel, Thakur Magrati, and **Jay Ram Lamichhane** (2011). Antimicrobial activity of wild olive crude extracts in vitro. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 2(3):110-113,. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02643654>.
70. **Jay Ram Lamichhane**, Giorgio M. Balestra, and Leonardo Varvaro (2011). Severe outbreaks of bacterial canker caused by *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* (Smith) Davis et al. on tomato in central Italy. *Plant Disease*, 95(2):221-221,. doi: 10.1094/PDIS-09-10-0635. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02649167>.
71. **Jay Ram Lamichhane**, Leonardo Varvaro, and Giorgio M. Balestra (2010a). Black rot of Brassica spp. caused by *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* in mid-western region of Nepal. *Journal of Plant Pathology*, 92(4):PS.114,. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02663044>.
72. **Jay Ram Lamichhane**, Giorgio M. Balestra, and Leonardo Varvaro (2010b). First Report of bacterial spot caused by *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria* race 2 in Nepal. *New Disease Reports*, 22:25-25,. doi: 10.5197/j.2044-0588.2010.022.025. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02663782>.
73. **Jay Ram Lamichhane**, Leonardo Varvaro, and Giorgio M. Balestra (2010c). Bacterial leaf spot

caused by *Xanthomonas cucurbitae* newly reported on pumpkin in Nepal. New Disease Reports, 22:20-20,. doi: 10.5197/j.2044-0588.2010.022.020. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02654347>.

74. **Jay Ram Lamichhane**, Giorgio M. Balestra, and Leonardo Varvaro (2010d). Occurrence of Potato Soft Rot Caused by *Erwinia carotovora* (synonym *Pectobacterium carotovorum*) in Nepal: A First Report. Plant Disease, 94(3):382-382,. doi: 10.1094/PDIS-94-3-0382C. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02657145>.
75. **Jay Ram Lamichhane**, MB Kshetri, Angelo Mazzaglia, Leonardo Varvaro, and Giorgio M. Balestra (2010e). Bacterial speck caused by *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* race 0: A first report in Nepal. Plant Pathology, 59(2):401-401,. doi: 10.1111/j.1365-3059.2009.02131.x. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02655790>.
76. **Jay Ram Lamichhane**, Giorgio M. Balestra, and Leonardo Varvaro (2010f). Responses of tomato cultivars largely cultivated in Nepal to *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*. Phytopathologia Mediterranea, 49: 406-413,. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02662102>.
77. **Jay Ram Lamichhane**, Angelo Mazzaglia, MB Kshetri, Leonardo Varvaro, and Giorgio M. Balestra (2009). First report of crown gall of *Prunus* spp. caused by *Agrobacterium tumefaciens* biovar 1 in Nepal. Journal of Plant Pathology, 91(4):112,. doi: 10.4454/jpp.v91i4sup.583. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02657617>.
78. Giorgio M. Balestra, **Jay Ram Lamichhane**, MB Kshetri, Angelo Mazzaglia, and Leonardo Varvaro (2009). First report of olive knot caused by *Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi* in Nepal. Plant Pathology, 58(2):393-393,. doi: 10.1111/j.1365-3059.2008.02007.x. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02665304>.

Agenda de recherche stratégique

1. Lamichhane, J. R., and Messéan, A. (Coordinators). 2016. Strategic research agenda for IPM in Europe, pp. 36. Available at: <http://c-ipm.org/news/nyhed/artikel/coordination-of-integrated-pest-management-on-the-agenda/>.

Chapitres d'ouvrage

1. Jean-Noël Aubertot, Jean-Philippe Deguine, **Jay Ram Lamichhane**, Marie-Hélène Robin, Jean-Pierre Sarthou, and Christian Steinberg (2020). Vers une protection agro-écologique des cultures en phase d'implantation. In Réussir l'implantation des cultures. Enjeux agroécologiques, itinéraires techniques., number 1^{ère} édition in Savoir Faire (Quae), page 440. Editions QUAE - Arvalis Institut du Végétal,. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02790952>. Prod 2020-1b SPE IPM INRA.
2. Marc Barzman, **Jay Ram Lamichhane**, Kees Booij, Piet Boonekamp, Nicolas Desneux, Laurent Huber, Per Kudsk, Stephen R. H. Langrell, Alain Ratnadass, Pierre Ricci, Jean-Louis Sarah, and Antoine Messean (2015b). Research and development priorities in the face of climate change and rapidly evolving pests. In Sustainable Agriculture Reviews, volume 17 of Sustainable Agriculture Reviews, page 27 p. Editions Springer,. doi: 10.1007/978-3-319-16742-8 1. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01536572>.

Communications dans des conférences

➤ Communications invitées

3. **Jay Ram Lamichhane** and Jean-Noel Aubertot (2018). A conceptual framework to better understand the role of phytobiome on field crop establishment. In International Phytobiomes Conference 2018, page 14 p., Montpellier, France, December. URL [HTTPS://HAL.ARCHIVES-OUVERTES.FR/HAL-01991471](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01991471).
4. **Jay Ram Lamichhane** (2018). Breeding for IPM to boost sustainable crop protection in Europe. In Nationella växtskyddskonferensen, Uppsala, Sweden, November. URL [HTTPS://HAL.INRAE.FR/HAL-02785154](https://hal.inrae.fr/hal-02785154).
5. **Jay Ram Lamichhane** (2016). Challenges and opportunities for integrated pest management in Europe and worldwide : a european perspective. In European Master in Plant Health, page np, Valencia, Spain, September. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01604042>.

➤ Communications orales

6. **Jay Ram Lamichhane**, Jean-Noël Aubertot, Julie Constantin, Elana Dayoub, Philippe Debaeke, Pierre Maury, Céline Schoving, and Carolyne Durr (2020e). Harnessing crop models to pinpoint the establishment quality of field crops under the 21st century climate change: case studies of soybean and sugar beet in northern france. In 16th European Society of Agronomy Conference, Seville, Spain, September. URL [HTTPS://HAL.INRAE.FR/HAL-02937490](https://hal.inrae.fr/hal-02937490).
7. **Jay Ram Lamichhane**, Julie Constantin, Jean-Noël Aubertot, and Carolyne Durr (2019c). Will climate change affect sugar beet crop emergence of the 21st century? Insight from a simulation study. In 40. Biennial Meeting, page 12 p., Anaheim, United States, February. URL [HTTPS://HAL.INRAE.FR/HAL-02786878](https://hal.inrae.fr/hal-02786878).
8. **Jay Ram Lamichhane**, Marc Barzman, Kees Booij, Piet Boonekamp, Nicolas Desneux, Laurent Huber, Per Kudsk, Stephen Langrell, Alian Ratnadass, Pierre Ricci, Jean-Louis Sarah, and Antoine Messean (2015c). Diversification of current plant protection strategies to mitigate climate change effects. In 18. International Plant Protection Congress, page 38 p., Berlin, Germany, August. URL [HTTPS://HAL.ARCHIVES-OUVERTES.FR/HAL-01602261](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01602261).
9. Martin Lechenet, Violaine Deytieux, Daniele Antichi, Jean-Noel Aubertot, Paolo Barberi, Michel M. Bertrand, Vincent Cellier, Raphael R. Charles, Caroline Colnenne-David, Silke Dachbrodt-Saaydeh, Philippe Debaeke, Thierry Doré, Pascal Farcy, César Fernandez-Quintanilla, Gilles Grandeau, Cathy Hawes, Lionel Jouy, Eric E. Justes, Roman Kierzek, Per Kudsk, **Jay Ram Lamichhane**, Marco M. Mazzoncini, Bo Melander, Anna Camilla Moonen, Adrian C Newton, Jean Marie J. M. Nolot, Silvia Panozzo, Patrick Retaureau, Maurizio Sattin, Juergen Schwarz, Clotilde Toque, Vasileios Vasileiadis, and Nicolas Munier-Jolain (2015). Field testing of IPM-based cropping systems: a diversity of experimental approaches in Europe. In XVIII^o International plant protection congress, Berlin, Germany, August. URL [HTTPS://HAL-AGROPARISTECH.ARCHIVES-OUVERTES.FR/HAL-01359218](https://hal-agroparistech.archives-ouvertes.fr/hal-01359218).

10. **Jay Ram Lamichhane**, Silke Dachbrodt-Saaydeh, Per Kudsk, and Antoine Messean (2015d). From ENDURE to C-IPM: The power of networking to advance IPM implementation in Europe. In 8. International IPM Symposium: Solutions for a Changing World, page np, Salt Lake City, United States, March. URL [HTTPS://HAL.ARCHIVES-OUVERTES.FR/HAL-01602160](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01602160).
11. Antoine Messean and **Jay Ram Lamichhane** (2015). Coordinated integrated pest management in europe. In IPM Innovation in Europe, IPM Innovation in Europe, page 174 p., Poznan, Poland, January. URL [HTTPS://HAL.INRAE.FR/HAL-02740232](https://hal.inrae.fr/hal-02740232).
12. Cindy E. Morris, Claudia Bartoli, **Jay Ram Lamichhane**, Caroline Monteil, and Odile Berge (2014). From the ecology of *Pseudomonas syringae* to probable scenarios of future disease emergence. In 13. International Conference on Plant Pathogenic Bacteria (ICPPB), Program and abstract, page 126 p., Shanghai, China, June. URL [HTTPS://HAL.INRAE.FR/HAL-02738607](https://hal.inrae.fr/hal-02738607).
13. **Jay Ram Lamichhane**, Alfredo Fabi, and Leonardo Varvaro (2012c). Bacterial species associated to brown spots on Hazelnut in central Italy: survey, isolation and characterization. In 8. International Congress on hazelnut, volume 1 of Proceeding of the VIII International Congress on Hazelnut, page 376 p., Temuco, Chile, March. ISHS International Society for Horticultural Science. doi: 10.17660/ActaHortic. 2014.1052.33. URL [HTTPS://HAL.INRAE.FR/HAL-02740967](https://hal.inrae.fr/hal-02740967).
14. **Jay Ram Lamichhane**, Giorgio M. Balestra, Angelo Mazzaglia, MB Kshetri, and Leonardo Varvaro (2010g). An overview of bacterial diseases of the most important agricultural crops in Nepal. In 28. International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on Plant Protection, volume 917 of Proceedings of the International Symposium on Plant Protection, page 324 p., Lisbonne, Portugal, August. International Society for Horticultural Science (ISHS). doi: 10.17660/ActaHortic.2011.917.26. URL [HTTPS://HAL.INRAE.FR/HAL-02745400](https://hal.inrae.fr/hal-02745400).
15. **Jay Ram Lamichhane**, Giorgio M. Balestra, and Leonardo Varvaro (2010h). Comparison between two different olive species on their susceptibility towards *Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi*. In 12. International Conference on Plant Pathogenic Bacteria, La Réunion, France, June. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02812308>.

➤ Posters

16. Elana Dayoub, **Jay Ram Lamichhane**, Luc Champolivier, Colette Quinquy, Philippe Debaeke, Pierre Maury (2021). Le phénotypage précoce de traits racinaires du soja au service de la caractérisation de la diversité variétale et de la conception de systèmes de culture agroécologiques. Les 3^{èmes} Rencontres Francophones sur les Légumineuses (RFL3), Feb 2021, Angers, France. <https://hal.inrae.fr/hal-03169376v1>.
17. Jean-Noël Aubertot, Lionel Alletto, Laurent Bedoussac, Patrick Bertuzzi, François Brun, Vincent Cellier, Sylvie Colleu, Olivier David, Violaine Deytieux, Michel Duru, Caroline Gibert, **Jay Ram Lamichhane**, Françoise Lescourret, Sandrine Longis, Anna Camilla Moonen, Natacha Motisi, Célia Pontet, Alain Ratnadass, Hélène Raynal, Marie-Hélène Robin, Régis Sabbadin, Jean-Pierre Sarthou, Sébastien Simon, Yann Tricault, Wopke van der Werf, Aude Vialatte, Daniel

Wallach, and Jean- Philippe Deguine (2018). GASCON : Gestion agro-écologique de la santé des cultures et des organismes nuisibles. Enseigner et apprendre l'agro-écologie, October. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02789599>.

18. Mariagrazia Antonelli, Gianluca Beltrame, **Jay Ram Lamichhane**, and Leonardo Varvaro (2013). Bacteria isolated from compost as potential biological control agents of *Pseudomonas viridiava* on melon. Future IPM in Europe, March. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02804312>.

19. **Jay Ram Lamichhane**, Giorgio M. Balestra, and Leonardo Varvaro (2010). Phytobacteriological investigation on *Olea* spp. In different districts of Nepal. 13. MPU Congress, June . URL <https://hal.inrae.fr/hal-02812309>.

Tableau 2. Récapitulatif de mes productions scientifiques jusqu'au 31 août 2021. PIC : Protection Intégrée des Cultures; ACL: Articles dans des revues Internationales a comité de lecture; *Basée à la fois sur des approches expérimentales et de modélisation; Le numéro entre parenthèses indique le nombre de productions en tant que premier auteur.

Source	Production	Phytopathologie	Ecologie microbienne	PIC	Science du sol	Implantation
ACL	<i>Experimentation</i>	32 (15)	4 (2)	-	1 (1)	5 (4)
	<i>Modelisation</i>	-	-	-		4 (2 + 2*)
	<i>Synthèse (Review)</i>	4 (4)	3 (2)	10 (7)		5 (5)
	<i>Méta-analyse</i>	-	-	-		1 (0)
	<i>Editorial</i>	1 (1)	-	2 (2)		1 (1)
Non-ACL	<i>Chapitre d'ouvrage</i>	-	-	1 (0)		1 (0)
Conférence internationale	<i>Acte de conférence</i>	1 (1)	-	-		-
	<i>Article de vulgarisation</i>	1 (0)	-	-		1 (0)
	<i>Présentation orale invitée</i>	-	-	3 (3)		1 (1)
	<i>Présentation orale</i>	3 (3)	1 (0)	4 (3)		2 (2)
	<i>Poster</i>	1 (1)	1 (0)	1 (0)		-
	Total	43 (25)	9 (4)	21 (15)	1 (1)	21 (17)

CHAPITRE II : BILAN DES ACTIVITES SCIENTIFIQUES

1. SYNTHÈSE DE MES TRAVAUX DE RECHERCHE PRE-RECRUTEMENT

Contexte général

L'agriculture au XXI^e siècle est confrontée à un quadruple défi : augmenter la production agricole, réduire l'impact négatif de l'agriculture sur l'environnement, adapter les systèmes de culture au changement climatique en cours et préserver la viabilité de certaines exploitations. Plus spécifiquement, le premier défi, l'augmentation de la surface agricole d'une part et la réduction des pertes de récoltes dues à une série de facteurs abiotiques et biotiques d'autre part sont les deux principaux moyens de nourrir la population mondiale croissante. Cependant, une augmentation de la surface agricole signifierait une diminution de la surface non-agricole, comme celle dédiée à la forêt, ce qui aurait des impacts négatifs sur l'environnement. Par conséquent, la manière la plus efficace de maintenir ou d'augmenter la production agricole mondiale serait de mieux gérer les facteurs abiotiques et biotiques affectant le rendement des cultures. Plus spécifiquement aux facteurs biotiques, les pertes de récoltes dues aux bioagresseurs peuvent dépasser 80% (Oerke 2006) et celles causées par les agents pathogènes seules coûtent 220 milliards de dollars par an à l'économie mondiale (Savary et al. 2019). La plupart des augmentations de la production alimentaire mondiale par unité de surface réalisées au cours des six dernières décennies sont attribuées à une lutte plus efficace contre les bioagresseurs plutôt qu'à une augmentation du potentiel de rendement des cultures (Oerke 2006; Cassman 1999). Ces derniers sont en stagnation ou même en déclin dans plusieurs parties du globe (Ray et al. 2012) ; Figure 1).

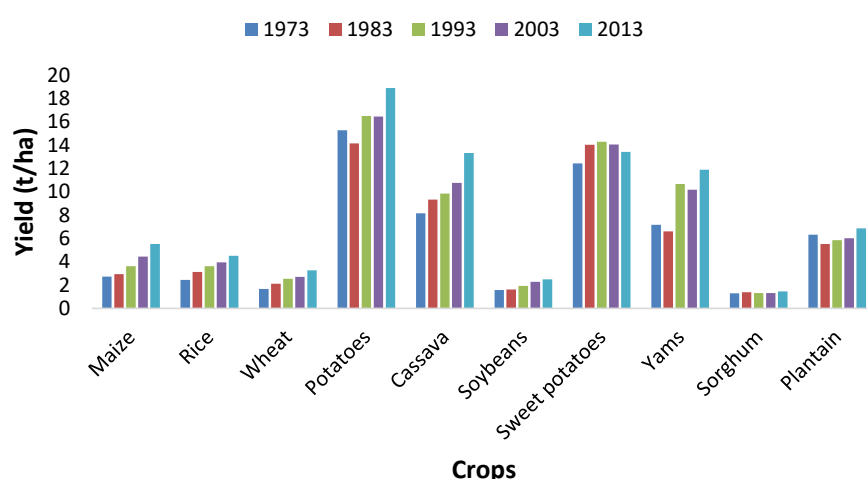


Figure 1. Évolution du rendement des dix principales denrées de base dans le monde de 1973 à 2013 (Source : FAOSTAT). Bien qu'une tendance à l'augmentation des rendements puisse être observée au cours des cinquante dernières années, de fortes fluctuations ont été observées pour certaines cultures telles que les pommes de terre, les patates douces, les ignames et le sorgho. Ces fluctuations du rendement des cultures peuvent être associées à des épidémies où les pesticides chimiques n'ont pas été efficaces ou n'étaient pas disponibles pour être utilisés (ACL 43).

Les pertes de récoltes dues aux bioagresseurs peuvent être limitées par l'application de mesures efficaces de protection des cultures. Parmi les techniques utilisées, l'application de pesticides de synthèse est la plus couramment utilisée du pré-semis jusqu'à la période post-récolte (Aktar et al. 2009; Cooper and Dobson 2007; Oerke 2006). En effet, les données de ventes des pesticides à l'échelle mondiale montrent une tendance à l'augmentation du marché mondial des pesticides qui dépasse plusieurs milliards de dollars par an (**Figures 2**). Plus spécifiquement à l'Europe, les ventes et l'utilisation des pesticides dans l'agriculture n'ont cessé d'augmenter au cours des années (**Figures 2 et 3**). Malgré différentes politiques publiques, il n'y a cependant pas de diminution de leur utilisation, y compris en France (Guichard et al. 2017).

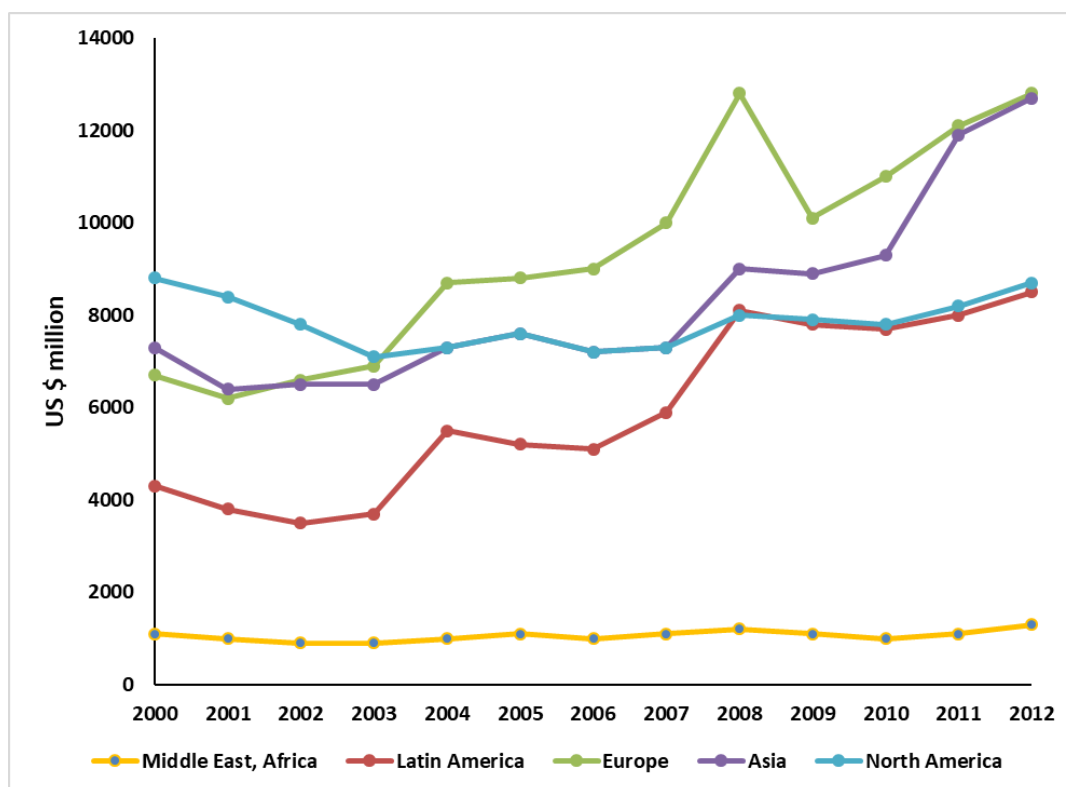


Figure 2. Données sur les ventes mondiales de pesticides de 2000 à 2012 (Stockstad and Grullon 2013). Les ventes de pesticides augmentent en Asie, en Amérique latine et en Europe. Aucune donnée n'est présentée après 2012 faute de complétude des données.

D'autre part, l'utilisation des pesticides au cours des six dernières décennies a entraîné une série d'impacts négatifs pour l'agriculture, l'environnement (en particulier la biodiversité) et la santé humaine (Tegtmeier and Duffy 2004; Geiger et al. 2010). Outre les coûts directs, l'utilisation des pesticides entraîne de nombreux coûts indirects ou externes (les économistes parlent d'externalités négatives). Ils comprennent la surveillance et l'assainissement, en cas de contamination, des sols, de l'eau potable ou des aliments, l'empoisonnement des utilisateurs de pesticides et des travailleurs agricoles (White and Hoppin 2004; Han et al. 2021) et les effets délétères sur les organismes non ciblés tels que les abeilles et autres insectes utiles (Rundlof et al. 2015; Main et al. 2020), les poisons, les oiseaux (Li et al. 2020; Zubrod et al. 2019), et la diversité microbienne du sol (Nettles et al. 2016; Zaller et al. 2016; Gomes et al. 2017). Certains de ces coûts sont externes au décideur spécifique et sont généralement pris en charge par la société. Il est désormais établi que de nombreux pesticides nuisent à la biodiversité et à la

santé humaine. Cependant, le calcul de l'ensemble des coûts externes liés à un pesticide et à ses différentes formulations pour des applications individuelles est complexe et n'a été que rarement effectué jusqu'à présent (Leach and Mumford 2008; Waibel and Fleischer 1998; Pretty et al. 2001; Bourguet and Guillemaud 2016).



Figure 3. Évolution des ventes de pesticides (%) entre 2011 et 2018 pour les États membres européens pour lesquels des données complètes sont disponibles à la fois en 2011 et en 2018 (D'après Aubertot et al. 2021 ; source : EUROSTAT).

L'évolution de la résistance aux pesticides parmi les populations de bioagresseurs est un autre facteur important qui justifie la nécessité de réduire notre dépendance à l'égard des pesticides. Par exemple, au cours de la dernière décennie, un grand nombre d'études ont signalé l'évolution de la résistance de divers champignons phytopathogènes et oomycètes aux fongicides (**Tableau 3**). Dans certains cas, le même agent pathogène a développé une résistance à des dizaines de ces fongicides. Il existe également des rapports sur l'évolution de la résistance des bactéries pathogènes aux bactéricides, y compris aux produits à base de cuivre (Cazorla et al. 2002; Shenge et al. 2014; Canteros et al. 2008) (**ACL 23**).

Tous ces éléments indiquent qu'il est nécessaire de réduire et/ou de mieux utiliser les pesticides dans l'agriculture.

Tableau 3. Quelques exemples d'études rapportant l'évolution de la résistance aux fongicides par les champignons phytopathogènes et les oomycètes au cours de la dernière décennie (**ACL 43**).

Agent pathogène	Résistance vis-à-vis de	Références
<i>Alternaria solani</i>	Boscalid, Penthiopyrad	Miles et al. 2013
<i>Ascochyta rabiei</i>	Pyraclostrobin	Delgado et al. 2012
<i>Botrytis cinerea</i>	Fenhexamid, Boscalid, Pyraclostrobin, Benomyl, Benzimidazole, Dicarboximide, Thiophanate-methyl, Iprodione, Fludioxonil, Fluopyram, Fluxapyroxad, Penthiopyrad, Trifloxystrobin, Cyprodinil, Carbendazim, Diethofencarb, Procymidone, Pyrimethanil, Anilinopyrimidine, Phenylpyrrole, Hydroxylanilide	De Miccolis Angelini et al. 2014 ; Bardas et al. 2010 ; Tanović and Ivanović 2010 ; Banno et al. 2008 ; Fernández-Ortuño et al. 2015 ; Amiri et al. 2014 ; Weber 2011 ; Sun et al. 2010 ; Myresiotis et al. 2007
<i>Calonectria pauciramosa</i>	Prochloraz, Thiophanate methyl, Methyl	Guarnaccia et al. 2014
<i>Cercospora kikuchii</i> , <i>C. sojina</i>	Benzimidazole carbamate, Quinone outside inhibitor	Price et al. 2015 ; Standish et al. 2015
<i>Colletotrichum cereale</i>	Azoxystrobin	Young et al. 2010
<i>Fusarium graminearum</i> , <i>F. carpophilum</i>	Carbendazim, Azoxystrobin	Chen and Zhou 2009 ; Luo et al. 2013
<i>Helminthosporium solani</i>	Thia-bendazole, Thiophanate-methyl	Geary et al. 2007
<i>Microdochium nivale</i> and <i>M. majus</i>	Strobilurin	Walker et al. 2009
<i>Monilinia fructicola</i>	Propiconazole, Methyl benzimidazole carbamate, Demethylase inhibitor	Brannen et al. 2005 ; Chen et al. 2013
<i>Oculimacula acuformis</i> and <i>O. yallundae</i>	Prothioconazole, Boscalid	Leroux et al. 2013
<i>Penicillium digitatum</i> , <i>P. expansum</i>	Fludioxonil, Pyrimethanil	Kim, Saito, and Xiao 2015 ; Caiazzo, Kim, and Xiao 2014 ; Xiao, Kim, and Boal 2011
<i>Peronospora belbahrii</i> , <i>P. litchii</i>	Mefenoxam, Carboxylic acid amide	Cohen et al. 2013 ; Wang et al. 2010
<i>Phytophthora capsici</i> , <i>P. infestans</i>	Mefenoxam	Café-Filho and Ristaino 2008 ; Childers et al. 2015
<i>Podosphaera fusca</i>	Fenarimol, Triadimenol	Lóopez-Ruiz et al. 2010
<i>Podosphaera xanthii</i>	Cyflufenamid	Pirondi et al. 2014
<i>Sclerotinia homoeocarpa</i>	Propiconazole, Thiophanate-methyl	Jo et al. 2008
<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Dimethachlon	Ma et al. 2009
<i>Venturia inaequalis</i>	Kresoxim-methyl, Dodine, Myclobutanil, Thiophanate-methyl, Benzimidazole	Chapman et al. 2011

Les activités de recherche que j'ai menées depuis ma thèse visaient à mieux comprendre l'étiologie, l'écologie et l'épidémiologie de différents agents pathogènes et des maladies qu'ils provoquent sur de nombreuses cultures. L'objectif transversal à l'ensemble de mes travaux était de prévenir l'apparition de maladies ou de contenir les développements épidémiques, ce qui contribuera finalement à réduire l'utilisation des pesticides appliqués pour contrôler les différentes maladies des plantes. Cette section présente un bref aperçu de mes recherches antérieures et des principaux résultats obtenus qui ont contribué à une meilleure compréhension du fonctionnement des différents pathosystèmes. L'objectif finalisé de mes recherches était de réduire la dépendance aux pesticides et de favoriser une gestion durable de la santé des plantes, basée sur la PIC.

Une gestion plus efficace des maladies des plantes à travers une meilleure compréhension de leurs étiologies et des mécanismes épidémiques

Le pathosystème olivier-*Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi*

J'ai réalisé ma thèse de doctorat en **phytopathologie** dans le cadre d'un projet de la FAO intitulé « Promotion de la production et de la consommation d'olives au Népal » (GCP/NEP/056/ITA). Il s'agissait d'analyser le risque phytosanitaire du pathogène bactérien de l'olivier *Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi*, l'agent pathogène du chancre bactérien ou rogne (Young 2004). Cette maladie ne réduit pas seulement le rendement d'olivier mais affecte également la qualité de l'huile. Comme pour d'autres maladies bactériennes, aucune solution chimique n'est disponible pour lutter contre cette maladie. En effet, les antibiotiques précédemment utilisés ont été interdits dans plusieurs pays depuis trois décennies (Sundin and Wang 2018). Par conséquent, le principal moyen de gestion du chancre bactérien est basé sur la prévention, comme l'utilisation de variétés résistantes ou tolérantes, ou encore l'utilisation de matériel végétal sain. Ceci est fondamental car le chancre bactérien de l'olivier est extrêmement difficile à éradiquer une fois qu'il s'est établi dans une région.

Plus spécifiquement, j'ai étudié si une introduction d'espèce d'olivier européen (*Olea europaea* L.) au Népal pouvait augmenter le risque pour l'espèce d'olivier indigène (*O. cuspidata*), par le biais d'une introduction de *Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi* dans une phase latente. Mes travaux ont démontré que le chancre bactérien de l'olivier n'était pas présent dans la partie nord-ouest du Népal, ni sur les oliviers européens nouvellement plantés, ni sur l'espèce d'Olea indigène (**ACL 63**). De même, aucune présence de *Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi* n'a été relevée sur la surface foliaire des espèces indigènes d'olivier dans cette région. Cette constatation était nouvelle puisque *Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi* a été signalé comme un épiphyte ubiquiste de l'olivier européen souvent introduit à travers les stocks de pépinière à de nouvelles régions d'implantation. Cependant, j'ai démontré que l'introduction d'une nouvelle espèce végétale dans une zone donnée n'introduit pas nécessairement l'agent pathogène lorsque le matériel végétal est rigoureusement surveillé quant au risque phytopathologique. En même temps, par inoculation artificielle, j'ai également démontré la capacité de survie endophytique de *Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi* sur d'olivier indigènes, ce qui suggère que le pathogène pourrait coloniser *O. cuspidata* et rester dans une phase latente sans nécessairement provoquer de symptômes de maladie. En effet, *O. cuspidata* est très sensible au *Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi* et ce pathogène bactérien est capable de se développer aussi bien sur les parties endophytes qu'épiphytes de cette plante (**ACL 63 ; Figure 4**).

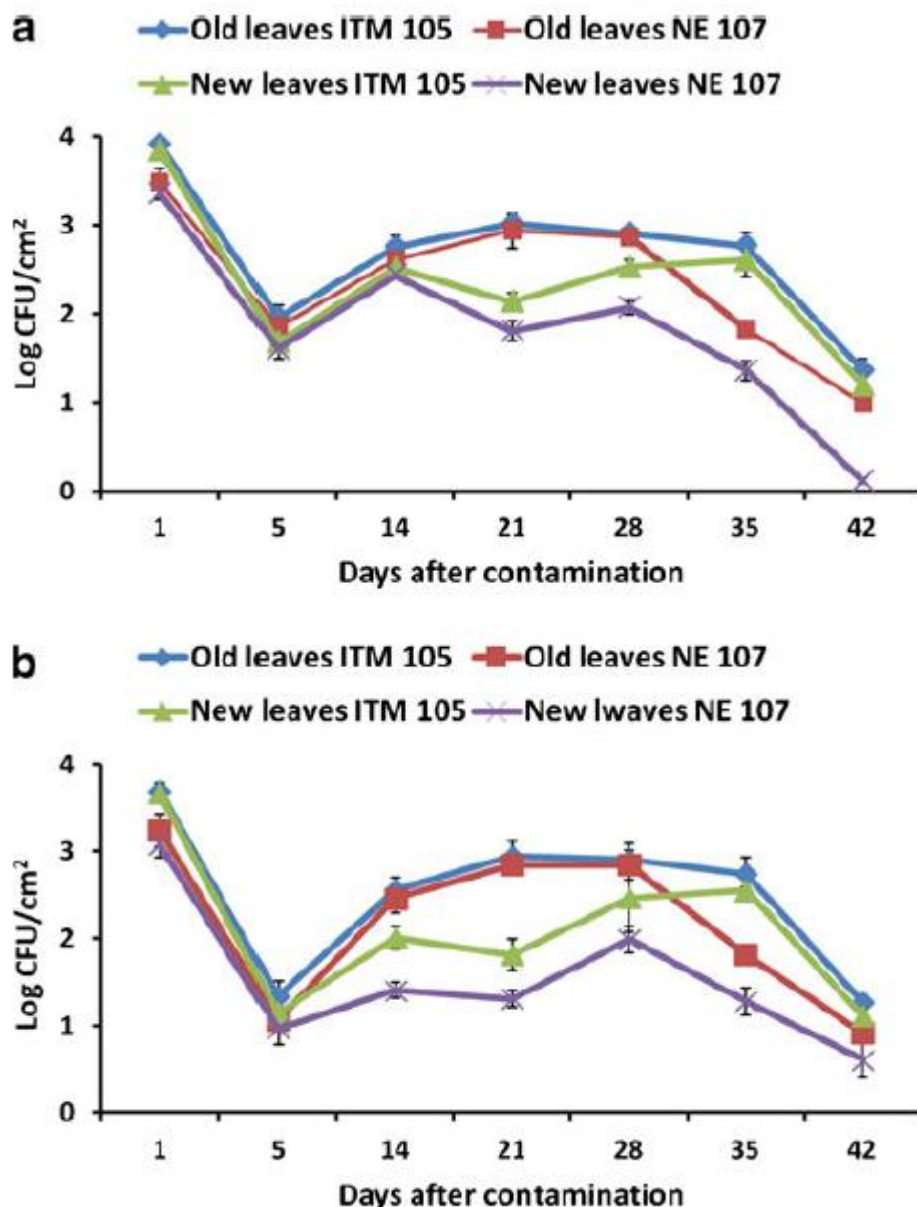


Figure 4. Dynamique de multiplication de deux souches différentes de *Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi* sur la surface des feuilles d'*Olea cuspidata* (a) et *O. europaea* cv. Leccino (b). Les barres d'erreur indiquent les écarts-types (n = 8).

Les pathosystèmes noisetier-*Xanthomonas arboricola*/Pseudomonas syringae/Cytospora corylicola

Pendant mes recherches post-doctorales en Italie, j'ai travaillé sur l'épidémiologie des maladies fongiques et bactériennes du noisetier en utilisant des analyses au laboratoire et des techniques de géostatistique. Plus précisément, j'ai étudié la brûlure bactérienne causée par *Xanthomonas arboricola* pv. *corylina*, le chancre bactérien causé par *Pseudomonas syringae* pv. *avellanae* et la cytosporose causée par le champignon *Cytospora corylicola*. Bien que toutes ces maladies du noisetier soient présentes dans la plupart des régions de culture de l'Italie centrale, leur apparition et leur propagation ont été largement hétérogènes. Compte tenu de l'importance de la culture du noisetier dans cette zone (environ 30 000 ha), il était impossible de caractériser l'évolution des maladies dans l'espace et dans le temps en utilisant des méthodes classiques d'observation de terrain. En outre, étant donné que

l'incidence et la sévérité de la maladie présentaient de fortes hétérogénéités (Fabi and Varvaro 2006), il était important d'identifier leurs déterminants sous-jacents. Ainsi, l'objectif de mon projet post-doctoral a été de comprendre l'effet de chaque facteur susceptible de contribuer à l'apparition et à la propagation des maladies. En particulier, j'ai étudié le rôle du climat (température, précipitations, gelées), du sol (pH, contenu en macro- et micronutriments), des pratiques culturales (irrigation, élagage et fertilisation) et de caractéristiques des plantes (cultivar, âge) sur l'apparition et la propagation des maladies.

L'hypothèse était que certains facteurs défavorables prédisposaient les plants de noisetier aux attaques d'agents pathogènes. Pour tester cette hypothèse, j'ai organisé ces travaux en cinq étapes : i) récupération des données pédologiques et climatiques existantes concernant les sites d'étude et interpolation des résultats à travers le paysage en utilisant une technique du krigeage ; ii) réalisation de nombreuses observations de terrain afin de mesurer l'incidence des maladies et échantillonnage de plantes avec ou sans symptômes ; iii) utilisation de valeurs interpolées pour les sites où l'incidence de la maladie a été mesurée afin d'effectuer une analyse de corrélation à l'aide de modèles de régression ; iv) isolement et caractérisation d'agents causaux putatifs à partir des tissus végétaux échantillonnés ; et enfin v) inoculation de souches bactériennes ou fongiques sur plantes afin de vérifier les postulats de Koch en conditions semi-contrôlées.

L'utilisation de modèles spatiaux, associée à mes compétences en microbiologie et en phytopathologie, m'ont permis de tirer des conclusions pour chaque contexte de production. De plus, l'analyse simultanée de différents pathosystèmes m'a permis de comprendre la spécificité de chacun d'entre eux. En particulier, j'ai mis en évidence qu'une large gamme d'interactions entre les facteurs pédoclimatiques (notamment la pluviométrie, la température en été, les teneurs en azote et en matière organique du sol) et les pratiques agricoles (notamment la fertilisation azotée et l'élagage végétal) conduisait à des incidences et des sévérités très différentes selon le pathosystème considéré (**ACL 42 ; ACL 59 ; ACL 64 ; Figures 5 et 6**). Il apparaît ainsi qu'une connaissance approfondie de la biologie des agents pathogènes des plantes permet d'adapter les pratiques agricoles au contexte de production, de manière à minimiser la survie et la dispersion des pathogènes.

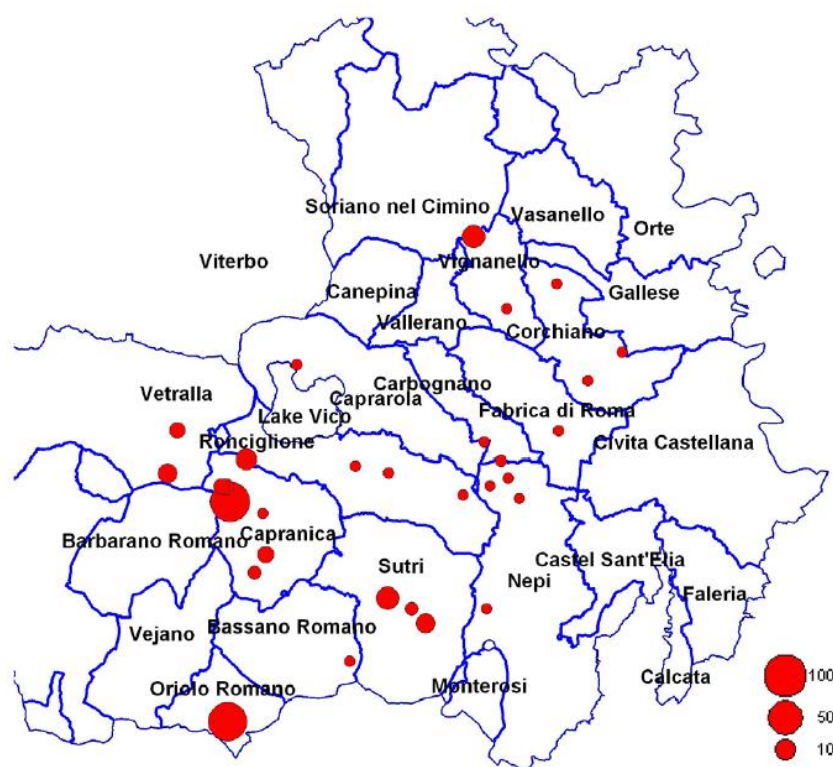


Figure 5. Incidence de la brûlure bactérienne (%) sur les sites de l'étude dans la province de Viterbe. La taille du cercle rouge à l'intérieur de la carte indique les différentes incidences de la maladie exprimées en échelle logarithmique.

Plus précisément, j'ai mis en évidence qu'un même facteur pouvait favoriser certains agents pathogènes et n'avoir aucune influence sur d'autres. J'ai ainsi démontré qu'une densité élevée de couvert associée à des pluies fréquentes conduisaient à des conditions idéales pour déclencher des infections par des bactéries épiphytes telles que *X. arboricola* pv. *corylina* (**ACL 64**), alors que la même combinaison n'avait pas d'impact sur le développement de l'agent pathogène fongique *C. corylicola* (**ACL 59**). De même, une plus grande disponibilité en azote du sol a augmenté l'incidence des maladies bactériennes, mais n'a pas favorisé *C. corylicola*. Ces résultats revêtent une importance particulière pour la prévention et la réduction des maladies du noisetier car la plupart des facteurs, et en particulier ceux liés au sol, peuvent être modifiés par des pratiques agricoles appropriées (Tous et al. 1994).

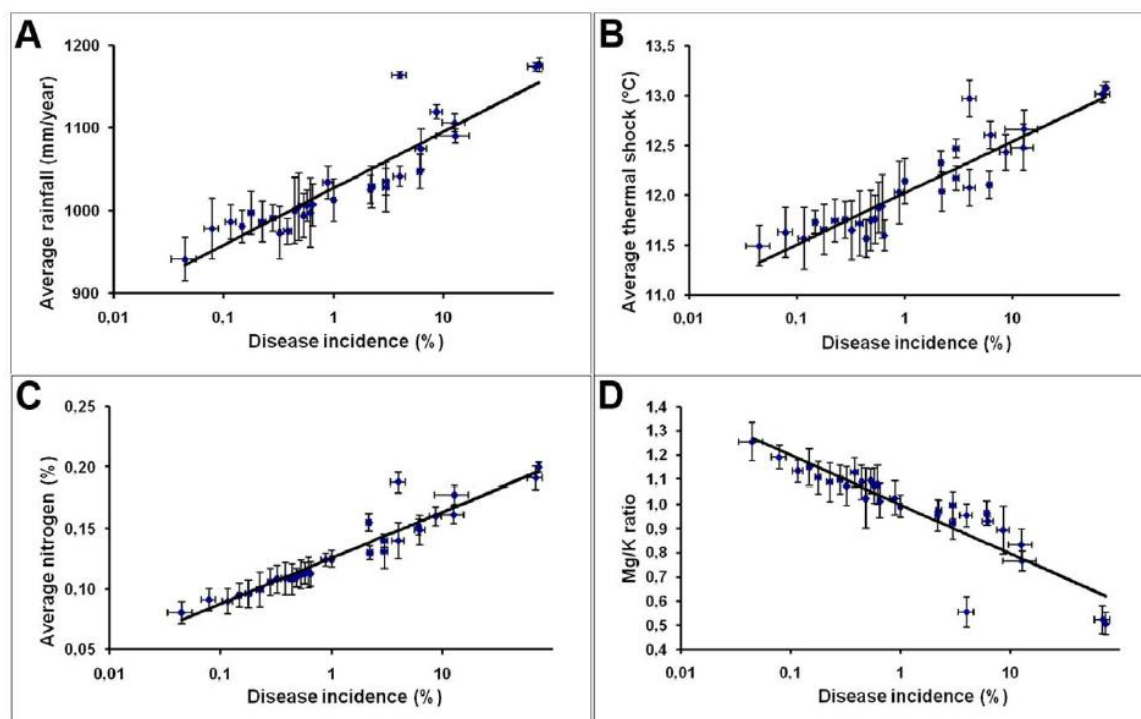


Figure 6. Corrélation entre l'incidence moyenne de la brûlure bactérienne (%) de chaque site avec différents facteurs pédoclimatiques. (A) valeurs moyennes des précipitations ($t = 11.54$; $p < 0.001$; $r^2 = 0.82$), (B) choc thermique associé au gel ($t = 11.65$; $p < 0.001$; $r^2 = 0.82$), (C) teneur en azote du sol ($t = 17.34$; $p < 0.001$; $r^2 = 0.91$) et (D) rapport Mg/K dans le sol ($t = 210.64$; $p < 0.001$; $r^2 = 0.80$). Les barres horizontales et verticales représentent les écarts-types de l'incidence de la maladie et des variables pédoclimatiques, respectivement. Il y avait six répétitions par site ($n = 6$).

Ces résultats proviennent de la mise en œuvre d'un diagnostic agronomique en parcelles agricoles mobilisant des analyses de terre, des données climatiques, des protocoles pour caractériser l'incidence et la sévérité de différentes maladies, ainsi qu'un inventaire de l'historique des pratiques agricoles par enquête auprès des agriculteurs concernés. Ces résultats, valorisés académiquement, ont également conduit, via un retour aux agriculteurs, à des modifications concrètes de certaines de leur pratiques qui ont contribué à réduire les risques de développement des épidémies.

Gamme d'hôtes chez les pathovars de *Pseudomonas syringae*

Pendant mon deuxième posdoc, j'ai travaillé sur un projet de recherche portant sur la détermination de la gamme d'hôtes du complexe d'espèces bactériennes *Pseudomonas syringae* à l'INRA d'Avignon. Malgré une vaste gamme d'hôtes de l'ensemble du complexe d'espèces *P. syringae*, plus de 50 variants pathogènes (pathovars) ont été identifiés. Ces « pathovars » sont des désignations sous-spécifiques pour indiquer la spécialisation de la gamme d'hôtes de souches particulières (Baltrus et al. 2011). À ce jour, il est généralement accepté que les souches appartenant au même pathovar sont virulentes sur les mêmes espèces végétales et que la gamme d'hôtes est assez restreinte. Ceci n'a pas été démontré pour *P. syringae*. La gamme d'hôtes d'un pathogène particulier a une implication forte sur la conception de stratégies de gestion de la maladie. L'objectif de mon projet de recherche était d'évaluer la spécificité des hôtes des « pathovars » de *P. syringae*. Pour ce faire, j'ai analysé l'aptitude de différentes souches de *P. syringae* représentées par différents pathovars à infecter plusieurs espèces de plantes, ainsi que leur capacité à se déplacer dans le système vasculaire de la plante. Ces caractéristiques revêtent une importance fondamentale étant donné que le commerce mondial des matériaux de pépinière est la principale source d'introduction d'agents pathogènes bactériens et la

principale cause des épidémies végétales qui en découlent (Scortichini et al. 2012). La compréhension du fonctionnement des pathosystèmes où l'espèce végétale peut être colonisée de manière latente (i.e. sans symptômes apparents) est essentielle pour améliorer les stratégies de gestion des maladies et pour prévenir l'introduction et limiter la propagation des agents pathogènes (Morris et al. 2019).

Test C-2013		Sprinch	Ranunculus	Plum Marina GF8-1	Kiwi plants	Hazelnut	Plum Myobolan plants	Cherry Pontaleb plants	Mustard	Poplar	Apricot Manicot plants	Cowpea	Clower	Soybean	Sorghum	Tomato	Melon	Peach Rubira plants	Peach Montclar plants	Sunflower	Favabean	Geranium
CFBP4219		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CFBP3205		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PaVt10		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	ND	0	0	0	0	0	ND	0
CFBP3226		0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CFBP4217		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
MAFF301020_PG03		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
NCPPB2445		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CFBP3225		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
KG004		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
MAFF302280_PT		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0
CFBP1754		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
NCPPB3335		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
NCPPB3489		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	ND	0	ND	0	0	ND	1	1	1	1	0
CFBP4060		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
CFBP6109		0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
CFBP1702		0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
IsPave037		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1
1448A		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1
PaVT28		0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	ND	0	ND	1	0	ND	1	1	1	1	1
USA0007		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1
1_6		0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1
CC1544		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1
CSZ0350		0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1
MAFF302278		0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1
AF0015		0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
KN10		0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
NCPB2585		0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
B728a		0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
0893_23		0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
PseNe107		0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1
CFBP1657		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
KW30		0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
PA459		0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1
ICMP18882		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
NCPB4227		0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
CFBP7286		0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
BS002		0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
41A		0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Figure 7. Gamme d'hôtes des souches du complexe d'espèces *Pseudomonas syringae*. Les cases noires correspondent à des interactions plantes-souches, où au moins 3 des 4 plantes herbacées inoculées avaient des scores de maladie > 1, et où au moins 3 des 4 plantes ligneuses inoculées présentaient des lésions externes de longueur supérieure à 0,1 cm. Les souches sont disposées en fonction du nombre d'hôtes et les espèces végétales sont disposées en fonction du nombre de souches virulentes. ND indique des données manquantes. Les lignes et les colonnes correspondent aux souches et aux espèces végétales, respectivement.

J'ai démontré qu'il n'existe pas de spécificité d'hôte au niveau du pathovar mais plutôt au niveau de la souche de *P. syringae* (Figure 7). En particulier, j'ai mis en évidence que les souches appartenant à un même pathovar montraient des réponses différentes en termes de gamme d'hôtes, de mouvement systémique et d'agressivité. Ces résultats sont en contradiction avec ce qui est souvent exprimé dans la littérature sur la spécialisation d'hôte des pathovars de *P. syringae* et remettent en cause la pertinence

de cette sous-division des espèces de ce complexe bactérien. Ces résultats auront donc un impact majeur sur la vision classique adoptée en phytobactériologie, fournissant ainsi un point de vue différent sur l'épidémiologie et la gestion des maladies bactériennes causées par *P. syringae*.

Sur la base des résultats sur la gamme d'hôtes testée, j'ai regroupé les souches utilisées dans l'expérimentation en trois ensembles : i) les souches ayant une large gamme d'hôtes, aussi bien des plantes annuelles que pérennes, ainsi qu'un niveau élevé d'agressivité ; ii) les souches colonisant et infectant uniquement les espèces de plantes pérennes ou annuelles ; et iii) les souches ayant une gamme d'hôtes très étroite.

Étude de la dynamique des populations d'agents pathogènes bactériens et de leurs antagonistes potentiels dans la phyllosphère des plantes

Écologie bactérienne de la phyllosphère de l'olivier

Pendant ma thèse j'ai notamment concentré mon attention sur la compréhension de l'écologie bactérienne de la phyllosphère de deux espèces d'olivier, une espèce indigène (*O. cuspidata*) et une autre introduite (*O. europaea*) dans le centre-ouest du Népal. Les objectifs de cette étude étaient de déterminer la composition qualitative et quantitative des espèces bactériennes de la phyllosphère colonisant ces espèces d'olivier, et de sélectionner des agents potentiels de biocontrôle parmi les espèces bactériennes contre l'agent pathogène du chancre bactérien de l'olivier. En tout, j'ai identifié huit espèces bactériennes majeures colonisant la phyllosphère des oliviers. Leur densité de population était significativement affectée par le génotype de l'olivier, l'année et leurs interactions (**ACL 58 ; Figure 8 ; Tableau 4**).

Table 4. Effets du cultivar, de l'année et de l'interaction cultivar-année sur la taille de la population bactérienne épiphyte des cultivars d'olivier au Bajura de 2007 à 2009. SS, sum of squares ; MS, mean square ; Df, degrees of freedom ; F, the ratio of two two mean squares ; S, significance level at $P \leq 0.001$. ^aR Squared = 0.892 (Adjusted R Squared = 0.866).

Source	SS	Df	MS	F	S
Corrected Model	526.80 ^a	92	5.73	33.48	0.000
Intercept	3600.07	1	3600.07	21047.59	0.000
Cultivar (C)	60.55	30	2.02	11.80	0.000
Year (Y)	372.11	2	186.06	1087.77	0.000
(C × Y)	94.12	60	1.57	9.17	0.000
Error	63.63	372	0.17		
Total	4190.49	465			
Corrected Total	590.42	464			

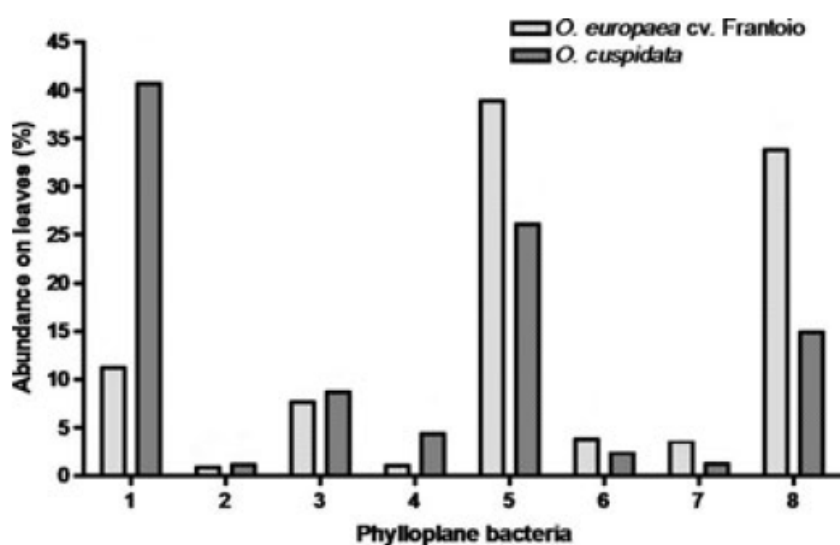


Figure 8. Proportions de différentes espèces bactériennes sur les feuilles de *Olea europaea* (cv. Frantoio) et *O. cuspidata* collectées en 2007 dans le district de Bajura. Les chiffres consécutifs de 1 à 8 représentent les bactéries de la phylloplane d'olivier : *Bacillus* sp. (1), *Brenneria alni* (2), *Micrococcus luteus* (3), *Microbacterium testaceum* (4), *Pantoea agglomerans* (5), *Pseudomonas fluorescens* (6), *Pseudomonas putida* (7) et le groupe *Xanthomonas campestris* (8).

Bien que certaines espèces de souches bactériennes appartenant au genre *Pseudomonas* aient montré un certain potentiel de biocontrôle contre les pathogènes bactériens *in vitro*, aucun effet d'antagonisme n'a été observé en serre. Ceci montre que les conditions environnementales affectent l'efficacité des agents de biocontrôle, et qu'il est nécessaire de mettre en place des recherches pour comprendre les mécanismes clés qui sous-tendent le potentiel de biocontrôle des bactéries isolées des phylloplans. Ce travail fut une expérience enrichissante pour moi et mes activités de recherche actuelles, car cette approche peut être utilisée contre les agents pathogènes du sol responsables de la fonte des semis, bien que dans ce cas, l'accent doive être mis sur l'écologie microbienne du sol.

Analyse des effets de l'environnement non agricole sur l'émergence de maladies d'espèces cultivées

De nouvelles maladies économiquement importantes sur différentes cultures émergent de manière récurrente (Elena et al. 2011; Santini et al. 2013). Un exemple récent est l'épidémie de chancre bactérien du kiwi qui est au moins la quatrième épidémie de cette maladie causée par *Pseudomonas syringae* en à peine 50 ans, chaque épidémie étant causée par des lignées génétiques différentes de la bactérie (Scortichini et al. 2012). Comprendre d'où viennent les nouveaux pathogènes et comment ils évoluent est fondamental pour le déploiement de méthodes de surveillance précises des maladies.

A l'occasion de mes travaux à l'INRA d'Avignon, j'ai contribué à un projet de recherche qui traitait du potentiel épidémique des agents pathogènes végétaux dans les réservoirs environnementaux (eau de rivière, biofilms épilithiques), en portant une attention particulière aux épidémies du chancre bactérien du kiwi causées par *P. syringae* (**ACL 54 ; Figure 9**). Les objectifs de ce travail étaient de comprendre si : i) les souches bactériennes isolées dans des environnements non agricoles pouvaient provoquer des maladies sur le kiwi ; ii) les souches épidémiques (isolées dans des environnements agricoles) pouvaient coexister avec les souches issues d'autres éléments du paysage (appelées souches

environnementales) ; iii) les souches environnementales et épidémiques avaient des gammes d'hôtes similaires.

Pour répondre à ces questions, nous avons évalué la pathogénicité, la capacité de colonisation endophytique et la compétitivité sur kiwi de souches de *P. syringae* génétiquement similaires aux souches épidémiques et originellement isolées d'habitats aquatiques et subalpins. Toutes les souches environnementales possédant un opéron impliqué dans la dégradation des composés aromatiques via la voie du catéchol se sont développées de manière endophyte et ont causé des symptômes dans les tissus vasculaires de kiwi. Les souches environnementales et épidémiques ont montré avoir une large gamme d'hôtes (**Figure 10**), révélant leur potentiel en tant que futurs pathogènes d'un grand nombre d'espèces végétales (**ACL 54**). Les souches environnementales ont coexisté de manière endophytique avec une souche épidémique, et partageaient environ 20 gènes de virulence, mais il leur manquait six gènes de virulence présents dans toutes les souches épidémiques. En identifiant le contenu génétique spécifique dans des milieux génétiques similaires aux souches épidémiques connues, nous avons développé des critères pour évaluer le potentiel épidémique et étudier ces souches afin de prévoir et gérer l'émergence de maladies des plantes.

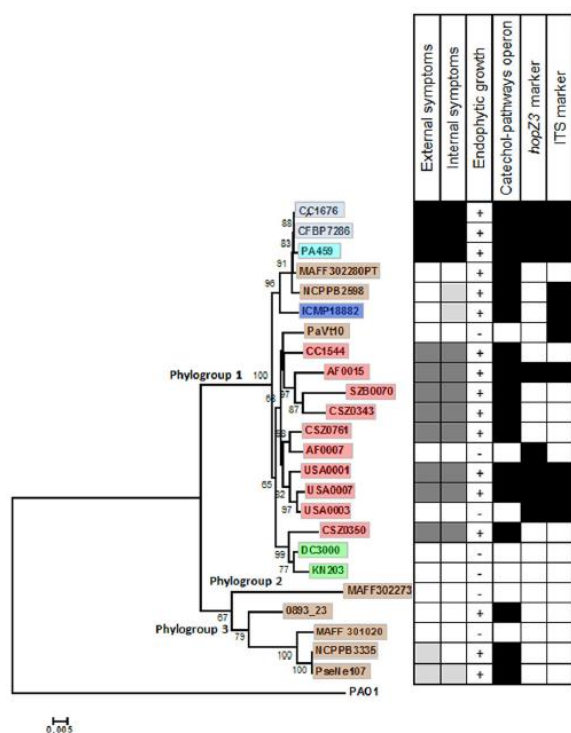


Figure 9. Arbre bayésien construit sur les séquences concaténées *cts*, *gyrB*, *rpoD* et *gapA* (1852 pb) des souches testées pour la pathogénicité, croissance endophytique et les marqueurs moléculaires. Les valeurs de bootstrap sont indiquées à chaque nœud. Les symptômes externes et internes sont indiqués par des cases noires (symptômes sévères), des cases gris foncé (symptômes intermédiaires), des cases gris clair (symptômes faibles) et des cases blanches (aucun symptômes). La présence de l'opéron catéchol impliqué dans la dégradation des composés, et de l'*hopZ3* et des ITS est indiquée par des cases noires (présents). Les cases blanches indiquent leur absence. Pour le catéchol opéron, tous les gènes étaient présents pour les souches positives. L'origine des souches et leur affiliation aux biovars sont indiquées par la couleur : bleu clair pour *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* (*Psa*) bv. 3, turquoise pour *Psa* bv. 1, bleu foncé pour *Psa* bv. 4, marron pour les souches isolées de hôtes ligneux, verts pour les souches isolées d'hôtes herbacés et rouge pour les souches environnementales.

		External symptoms				Internal symptoms				Endophytic growth			
Host species		CFBP 7286	ICMP 18882	USA0007	CC1544	CFBP 7286	ICMP 18882	USA0007	CC1544	CFBP 7286	ICMP 18882	USA0007	CC1544
Woody plants	Manicote apricot												
	Pontaleb cherry												
	Myrobolan plum												
	Mariana GF8-1 plum												
	Monclar peach												
	Rubira peach												
	Hazelnut												
	Oleander												
	Poplar												
Herbaceous plants	Soybean*												
	Faba bean*												
	Cowpea												
	Clover*												
	Sorghum												
	Tomato												
	Melon												
	Sunflower *												
	Spinach												
	Geranium*												
	Mustard												
	Ranunculus*												
	Liverwort												



Figure 10. Gamme d'hôtes des souches CFBP 7286, ICMP 18882, USA0007 et CC1544. La sévérité de la maladie est décrite par une échelle de gris. Pour la croissance endophytique, les cases noires indiquent que des souches se développent dans la plante hôte et qu'elles ont été ré-isolées même en absence de symptômes. Pour les souches pathogènes sur le soja, la fève, le trèfle, le tournesol, le géranium et la renoncule, la maladie a été observé uniquement sur les tiges (*). *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* (Psa) bv. 3 est indiqué en bleu, Psa bv. 4 en violet et les souches environnementales en rouge.

Pendant mon séjour à Avignon, j'ai également collaboré à un projet de recherche où nous avons démontré que la pathogénicité de *P. viridiflava*, un agent pathogène ayant une large gamme d'hôtes, était contrôlée par des processus de variation de phase (mutation phénotypique) corrélés avec l'hypermutableté et la résistance aux antibiotiques utilisés pour gérer des maladies bactériennes. Les résultats de cette étude ont montré que : i) alors que le variant transparent est résistant à plusieurs familles d'antibiotiques, le variant mucoïde ne l'est pas et, comme on l'a observé pour les agents pathogènes humains, les lignées résistantes sont hypermutables ; ii) les souches de type sauvage et le variant mucoïde ont causé des maladies sur le haricot, alors que le variant transparent n'était pas en mesure d'induire des symptômes de la maladie, bien qu'elle ait augmenté de façon endophytique dans la plante hôte ; et iii) aucune souche parmi le variant mucoïde, le variant transparent et les types sauvages n'a muté sur les gènes MMR. Nous avons démontré que : i) les résistances hypermutables et antibiotiques dans les lignées de *P. viridiflava* étaient produites naturellement dans cette bactérie à la fois *in vitro* et *in planta* ; et ii) un compromis entre l'aptitude à la résistance aux antibiotiques et le

potentiel infectieux pouvait être une stratégie que *P. viridiflava* adoptait au cours de son cycle de vie (ACL 51 ; Figure 11).

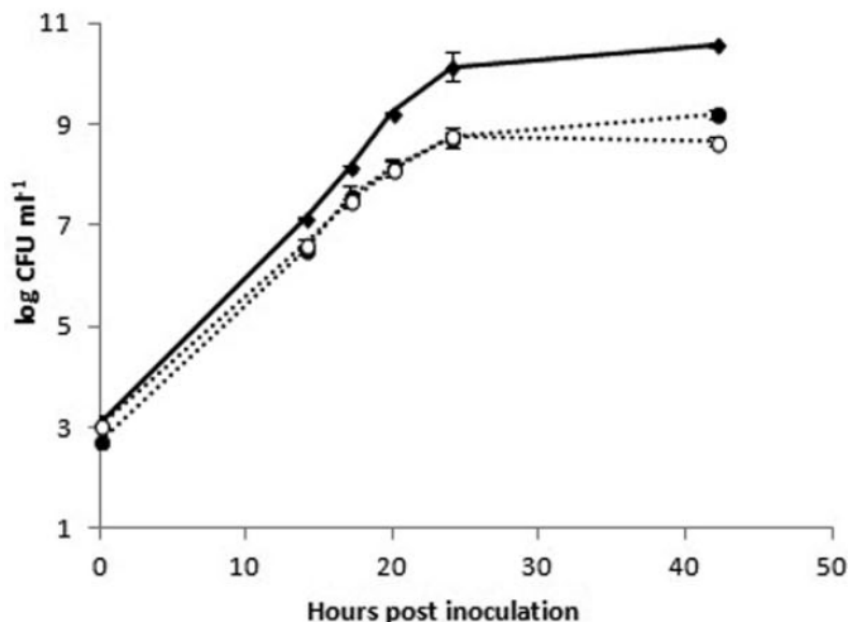


Figure 12. Aptitude des souches, évaluée par croissance *in vitro* de types sauvages, de variants mucoïdes et transparents de *Pseudomonas viridiflava*. Les types sauvages sont représentés par des lignes pleines et les variants avec des pointillés (●, mucoïde ; ○, transparent). Les écarts-types sont indiqués pour chaque moyenne (n = 4). CFU : unités formant colonie.

Ce travail a renforcé ma compréhension des systèmes de réparation de l'ADN des bactéries phytopathogènes et de la manière dont ils influencent le taux de mutation bactérien. Ces mécanismes ont des conséquences sur l'acquisition de nouveaux déterminants pathogènes et l'émergence de nouvelles maladies. L'ensemble de la réflexion conduite nous a amenés à rédiger un article de synthèse sur les mécanismes moléculaires sous-jacents à l'émergence des maladies bactériennes et le rôle de l'environnement sur ces mécanismes (ACL 45).

Protection Intégrée des Cultures comme principal levier pour réduire la dépendance aux pesticides dans les systèmes agricoles

La PIC a été définie comme l'utilisation potentielle de toutes les méthodes de protection des cultures disponibles et l'intégration de mesures appropriées qui limitent le développement de populations de bioagresseurs et maintiennent l'utilisation de produits phytosanitaires à des niveaux qui sont économiquement et écologiquement justifiés et réduisent ou minimisent les risques pour la santé humaine et l'environnement (European Commission 2009a). La PIC met l'accent sur la conduite d'une culture saine en perturbant le moins possible les agroécosystèmes, et encourage les mécanismes naturels de lutte contre les bioagresseurs. Pour les professionnels de la PIC, ce processus décisionnel implique l'utilisation coordonnée de différentes stratégies pour optimiser la gestion de toutes les classes de bioagresseurs d'une manière écologiquement responsable et économiquement rationnelle (ACL 55).

Les préoccupations croissantes des citoyens en Europe, à propos des conséquences négatives de l'utilisation des pesticides, ont conduit à l'élaboration d'une législation communautaire harmonisée

concernant la réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides dans l'UE. Cette législation est connue sous le nom de directive européenne sur l'utilisation durable des pesticides (European Commission 2009b). En vertu de cette directive, l'adoption des huit principes généraux de la lutte intégrée contre les bioagresseurs (**ACL 55**) est obligatoire pour tous les utilisateurs professionnels de pesticides dans les États membres de l'UE depuis le 1^{er} janvier 2014 (European Commission 2009a). Les huit principes généraux de la PIC offrent un large éventail d'options nous permettant d'adopter les approches les plus appropriées pour l'élaboration et la mise en œuvre de programmes de PIC.

Grâce à ma formation en agronomie et à mon expérience d'une dizaine d'années dans le domaine de la phytopathologie, j'ai été engagé à partir d'avril 2014 dans l'unité Eco-Innov de l'INRA à Thiverval-Grignon pour participer à la co-animation de deux réseaux européens en PIC. Mes fonctions concernent la coordination scientifique du réseau de chercheurs ENDURE (<http://www.endure-network.eu/>) et du réseau de financeurs ERA-Net C-IPM (<http://c-ipm.org/>).

Au sein de l'ERA-Net C-IPM, l'une des tâches les plus importantes qui m'a été confiée a été la conception, la rédaction et la finalisation du "programme de recherche stratégique en PIC en Europe" (**ARS 1**). Ce document a été commandé par la Commission Européenne et sera utilisé pendant les prochaines années comme document de référence pour la recherche et le développement de la PIC en Europe, en termes de priorités de recherche et de défis à relever (**Figure 12**). Les principaux objectifs du réseau C-IPM sont de créer une valeur ajoutée et des synergies en coordonnant les efforts nationaux de recherche et de vulgarisation en PIC -- qui visent à réduire la dépendance aux pesticides - - en mutualisant les ressources existantes. À cette fin, C-IPM a créé un forum pour l'échange et l'identification des priorités en PIC, fourni des recommandations sur la recherche nationale et européenne, relié les initiatives existantes et coordonné des appels de recherche transnationaux conjoints (**ACL 30 ; ACL 31 ; ACL 33 ; ACL 46 ; ACL 48**). Les informations les plus pertinentes recueillies dans le cadre de cette mise en réseau ont été utilisées pour l'élaboration d'un document programmatique sur les recherches à mener (**ARS 1**).

Au sein d'ENDURE, j'ai travaillé principalement sur les «actions collaboratives». L'objectif principal de ces actions était de créer un cadre de collaboration sur les thèmes et les actions en PIC qui sont identifiés comme des besoins communs des partenaires européens afin de prioriser l'élaboration et la mise en œuvre de mesures durables. En particulier, j'ai mis en avant la nécessité de poursuivre des expérimentations sur le terrain à long terme à travers l'Europe étant donné leur pertinence pour obtenir des données fiables concernant l'efficacité ou non des mesures de protection intégrée disponibles dans différentes situations de production. Cette dynamique facilitera notre compréhension de la possibilité ou non de réduire l'utilisation des pesticides conventionnels dans différents contextes européens sans compromettre les rendements des cultures. Par ailleurs, une meilleure utilisation des infrastructures européennes existantes en PIC est l'objectif d'ENDURE.

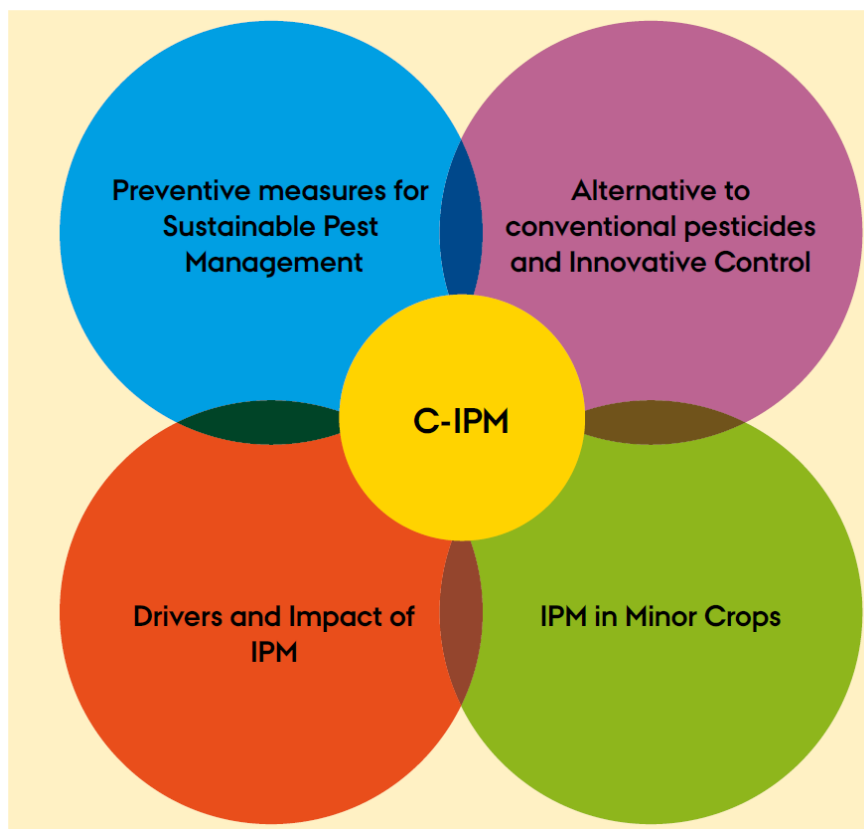


Figure 12. Quatre thèmes de recherche prioritaires pour la Protection Intégrée des Cultures en Europe (ASR 1)

Plusieurs discussions ont eu lieu au sein des réseaux ENDURE et C-IPM, grâce à des ateliers, des séminaires, des réunions annuelles et des activités de partage des connaissances. Cela a permis de construire une problématique de recherche en intégrant les connaissances disponibles et les points de vue de différentes disciplines et pays, renforçant ainsi la pertinence des pistes proposées.

Les interactions et échanges que j'ai eus au sein du réseau européen avec des collègues de diverses disciplines m'ont permis de rédiger et de publier de nombreux documents et articles scientifiques collectifs construits sur la base d'une vision et d'une réflexion commune des chercheurs européens (concernant notamment les défis actuels en matière de PIC en Europe, les obstacles liés au développement et à l'adoption des outils de protection intégrée, y compris le contrôle biologique et leurs perspectives (**ACL 30 ; ACL 31 ; ACL 33 ; ACL 46 ; ACL 48**). Ma participation active au sein de réseaux européens m'a permis de développer des stratégies pour élargir et renforcer mon réseau de recherche.

Bilan

Au fil des années, et avant mon recrutement à INRAE, j'ai eu l'occasion de travailler sur une série de sujets de recherche, notamment en pathologie végétale, l'écologie microbienne et la PIC dans différents pays, et dans des environnements multidisciplinaires. Bien que je sois agronome de formation, ces expériences m'ont permis de comprendre la biologie et l'épidémiologie d'un certain nombre d'agents pathogènes des plantes et comment la PIC peut être appliquée pour une gestion durable des maladies causées par des bioagresseurs. En même temps, en travaillant sur un certain nombre de pathosystèmes, j'ai également compris la complexité qui se cache derrière les cycles de vie des agents pathogènes des plantes, en raison des nombreuses différences dans leurs caractéristiques biologiques, ainsi que les défis que posent leur gestion. Cela a considérablement enrichi mon bagage scientifique, et

m'a permis de créer mon propre réseau qui sera d'une grande importance pour mes futurs projets de recherche au niveau national et international.

Mon troisième contrat post-doctoral, a consisté à co-animer deux réseaux européens, ce qui m'a permis de faire mes premières armes sur la coordination de la recherche. Bien que cette activité fût très enrichissante, la production de connaissances me manquait et j'ai décidé de revenir à la recherche. Cependant, ce retour à la recherche représentait un nouveau défi car, au fil des ans, j'ai travaillé sur des sujets très différents. J'ai recherché une thématique de recherche à INRAE correspondant à mon expertise, à l'interface entre différentes disciplines et combinant différentes approches. La création d'un poste de chercheur sur l'analyse et modélisation des facteurs abiotiques et biotiques affectant la qualité d'implantation des cultures semées a été une très excellente opportunité pour moi, et j'ai eu la chance de pouvoir la saisir !

2. SYNTHÈSE DE MES TRAVAUX DE RECHERCHE POST-RECRUTEMENT

Prise en charge du profil de poste et positionnement dans l'UMR AGIR

J'ai rejoint l'équipe VASCO de l'UMR AGIR depuis le 1^{er} septembre 2017 pour développer des recherches sur les déterminants biotiques et abiotiques de la germination des semences et de la levée des plantules. Mon projet de recherche, mobilise des approches expérimentales et de modélisation, afin de développer des stratégies de gestion de la phase critique de l'implantation des cultures. Ceci est particulièrement important pour l'adoption de pratiques agroécologiques qui peuvent avoir des répercussions sur la qualité de l'implantation des cultures : par exemple, l'introduction de cultures intermédiaires dans la succession des cultures, de cultures en relais ou en dérobé, le non-traitement de semences, ou encore la réduction du travail du sol. Il est donc nécessaire d'analyser et de modéliser les facteurs biotiques et abiotiques affectant la phase d'implantation des cultures.

Mon profil de recherche renforce et complète les compétences expérimentales et de modélisation de l'UMR AGIR en général, et de l'équipe VASCO en particulier, en apportant une expertise en Phytopathologie et en Agronomie systémique et, dans une moindre mesure, en l'Ecologie microbienne du sol. En particulier, les approches expérimentales de l'unité ont été renforcées pour générer des connaissances primaires sur l'implantation des cultures. Mes travaux constituent une valeur ajoutée puisque jusqu'à présent, seule la qualité globale de l'implantation des cultures était observée, et les déterminants sous-jacents n'étaient pas analysés. En ce qui concerne la modélisation, plusieurs travaux ont été menés dans l'UMR en utilisant le modèle d'émergence des cultures SIMPLE (Dürr et al. 2001) ou le modèle sol-culture STICS (Brisson et al. 1998) pour comprendre l'impact des stress abiotiques affectant l'implantation des cultures intermédiaires (Constantin et al. 2015; Tribouillois et al. 2018). Mes travaux assurent une continuité entre la dynamique préexistante dans l'unité sur cette thématique en intègrent les stress biotiques qui affectent la phase d'implantation sans sous-estimer le rôle des stress abiotiques car les deux interagissent et affectent la qualité de l'implantation des cultures.

Contexte et problématique de recherche

La phase d'implantation est affectée par un certain nombre de stress abiotiques (Constantin et al. 2015; Dürr et al. 2016; Dürr and Aubertot 2000; Gallardo-Carrera et al. 2007; Wijewardana et al. 2019) et biotiques (Moshgani et al. 2014; Griffin et al. 2015; Firake et al. 2016; You et al. 2017, 2018). Concernant les stress abiotiques affectant la phase d'implantation des cultures, la sécheresse représente le facteur le plus important qui affecte la germination des semences et la levée des plantules. Par exemple, l'absence d'humidité suffisante dans le lit de semence affecte l'imbibition des graines et réduit ou retarde considérablement le processus de germination des semences (Jacobsen et al. 2010; Wright 1971). De même, le stress hydrique peut entraîner la mort des plantules après la germination, comme c'est le cas par exemple pour les cultures semées en été, qu'il s'agisse de cultures intermédiaires multi-services (CIMS) (Constantin et al. 2015) ou de cultures de rente comme le colza, dans les régions méditerranéennes et tempérées. Ainsi, les stress mécaniques induits par les mottes de

terre ou les croûtes de battance peuvent affecter le processus d'élongation des plantules et provoquer leur mort avant la levée (Gallardo-Carrera et al. 2007).

Depuis une vingtaine d'années, un important travail d'expérimentation et de modélisation a été mené à l'INRA sur les facteurs abiotiques limitant la germination et l'émergence des cultures semées, notamment via le développement du modèle SIMPLE (Dürr et al. 2001). Cependant, ces travaux ne prennent pas en considération les facteurs biotiques qui peuvent affecter de manière significative la germination des semences et la levée des plantules (Horst, 2013). En effet, le modèle SIMPLE ne prend en compte actuellement que les effets d'un ensemble de facteurs abiotiques sur la phase de germination des semences et levée des plantules (potentiel hydrique et température du sol, présence ou non d'une croûte de battance ainsi que la taille, forme et répartition spatiale des agrégats). Ceci signifie que le taux d'émergence des cultures simulé par ce modèle pourrait être surestimé lorsque les semences ne sont pas traitées car les effets possibles des attaques d'agents pathogènes ou de ravageurs sur les semences et les plantules ne sont pas pris en compte.

Contrairement aux stress abiotiques, il existe peu d'informations dans la littérature sur l'effet des stress biotiques sur la germination des semences et l'émergence des plantules. Le peu d'efforts déployés jusqu'à présent pour lutter contre ces stress s'explique par le fait que pour gérer les stress biotiques en général, et les pathogènes transmis par le sol en particulier, des pesticides sont largement utilisés en traitement de semences et / ou appliqués sur le lit de semences (Hitaj et al. 2020; You et al. 2020), avec différents impacts sur la santé humaine (Zubrod et al. 2019; AGRICAN 2020; White and Hoppin 2004), la biodiversité (Pereira et al. 2020; Nettles et al. 2016; Zaller et al. 2016) et même sur la croissance des jeunes plantules (Vasanthakumari et al. 2019). Une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans cette phase, notamment des effets des pratiques agricoles sur le fonctionnement biologique du sol constitue donc un enjeu essentiel pour la conception de stratégies innovantes d'implantation des cultures. Cela est particulièrement vrai compte tenu de la transition agroécologique attendue (Duru et al. 2015) et de l'évolution de la législation sur les pesticides, tant au niveau européen qu'au niveau national, comme mentionné dans le plan national ECOPHYTO II+ (MAAF 2018). L'évolution de la législation sur les pesticides a déjà conduit au retrait de nombreuses molécules du marché européen (Hillocks 2012; Matyjaszczyk and Sobczak 2017). Dans ce contexte, il est important de comprendre si la qualité de l'implantation des cultures sera affectée par l'absence de traitements chimiques des semences. Dans l'affirmative, il sera nécessaire de générer des connaissances et de proposer des moyens pour mieux gérer les stress biotiques affectant la phase de germination-levée. Cette thématique de recherche originale se trouve à l'interface de différentes disciplines : Phytopathologie, Agronomie systémique et, dans une moindre mesure, Science du sol et l'Ecologie microbienne. Outre le caractère interdisciplinaire de la recherche à conduire, l'utilisation d'une approche combinant expérimentations au champ et au laboratoire et la modélisation est un atout précieux pour mener à bien les travaux.

Dans la section suivante, je vais rapporter brièvement les principales activités de recherche que j'ai menées dans différents domaines en utilisant différentes approches. J'exposerai ensuite les orientations futures que je souhaite donner à mon projet de recherche.

Travaux scientifiques en science du sol

Mon travail en science du sol a consisté à la mise en forme et à l'analyse de données sur l'impact du SDC et du climat sur l'état structural du lit de semences pour les grandes cultures. Les données traitées étaient issues d'une expérimentation système de long terme dans le nord de la France (Unité expérimentale INRAE d'Estrée-Mons). Ces résultats ont permis de mettre en forme une base de données qui permet de s'affranchir de la caractérisation de la structure du lit de semences d'une culture donnée, opération chronophage et fastidieuse. La méthode mise au point consiste à photographier l'état de surface d'un lit de semences et à comparer la situation étudiée avec la base de données. Il est alors possible de classer facilement une structure de lit de semences donnée en « fine », « intermédiaire » ou « grossière », en fonction de l'aspect visuel de l'état de surface du lit de semences. La structure du lit de semence affecte directement ou indirectement l'implantation des cultures semées en modifiant le contact sol-graine, en agissant comme obstacles mécaniques, ou modifiant la température, l'humidité et la teneur en oxygène du lit de semences, ainsi qu'en agissant sur les dynamiques de population des bioagresseurs.

J'ai démontré un effet statistiquement significatif des SDC, des cultures précédentes et de l'année sur la structure du lit de semence. Aucun effet irréversible du SDC sur la structure du lit de semence et le risque de générer des lits de semences plus grossiers n'a été observé au cours de la période étudiée (Figure 13).

Year	Cropping system I				Cropping system II				Cropping system III			
	SP	WW	OR	WW	SB	WW	M	WW	SB	WW	M	WW
1991	12	NT	NT	NT	12	NT	13	NT	16	NT	12	NT
1992	20	15	NT	9	10	13	13	17	6	33	11	17
1993	13	23	NT	22	17	36	26	27	10	54	10	35
1994	37	33	NT	31	20	34	18	29	21	50	17	38
1995	23	32	NT	23	22	37	22	33	32	39	29	34
1996	17	25	NT	21	6	27	17	24	16	31	7	37
1997	10	17	NT	21	12	26	11	25	20	NT	16	18
1998	10	17	NT	13	6	16	8	10	14	40	5	19
1999	14	19	26	21	12	17	13	26	27	40	16	39
2000	19	27	16	20	12	23	12	43	27	41	14	34
2001	10	28	NT	29	12	35	19	26	13	62	23	24
2002	12	31	NT	NT	17	36	11	42	19	55	11	56
2003	9	12	NT	NT	20	56	15	15	15	17	7	23
2004	NT	13	NT	NT	17	25	26	29	18	23	9	15
2005	NT	13	NT	NT	NT	8	NT	NT	NT	NT	NT	NT

Year	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
CS I	12	15	19	34	26	21	16	13	20	21	22	22	11	13	13
CS II	13	13	27	25	29	19	19	10	17	23	23	27	27	24	8
CS III	14	17	27	32	34	23	18	20	31	29	31	35	16	16	NT

CS I	SP	WW	OR	WW	CS II	SB	WW	M	WW	CS III	SB	WW	M	WW
	17	22	21	23		18	29	17	26		21	39	15	30

Previous crop	SP	22	OR	23	SB	29	M	26	SB	29	M	30
---------------	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	---	----

	Coarse seedbed (>20 mm soil aggregates >25%)
	Intermediate seedbed (>20 mm soil aggregates >15<25%)
	Fine seedbed (>20 mm soil aggregates <15%)

Figure 13. Pourcentage (rapports de masses) d'agrégats du sol de classe >20 mm dans le lit de semence de chaque culture pour trois systèmes de culture. S'agit-il de la classe de taille obtenue par tamisage avec trous circulaires. Les résultats sont basés sur les données mesurées à partir de parcelles ayant fait l'objet d'un travail du sol conventionnel et réduit. CS : SDC ; NT : non testé ; SP : pois de printemps (*Spring Pea*) ; WW : blé d'hiver (*Winter Wheat*) ; OR : colza oléagineux (*Oilseed Rape*) ; SB : betterave à sucre (*Sugar beet*) ; M : maïs (*Maize*). Les couleurs rouge, jaune et verte indiquent respectivement un lit de semences grossier, intermédiaire et fin (ACL 7).

Bilan

Ce travail m'a permis d'acquérir des connaissances clés en science du sol en général, et sur la façon dont la structure du lit de semence pouvait être affectée par les systèmes de culture, en particulier. La prise en main d'une vaste base de données m'a également permis de mieux comprendre l'importance de la structure du lit de semence sur la qualité d'implantation des cultures semées, et son rôle dans le modèle SIMPLE. Grâce à ce travail, et à la base de données associée, ces nouvelles informations sont désormais accessibles à tous et peuvent facilement être remobilisées dans d'autres projets de recherche.

Travaux scientifiques sur la phase d'implantation des cultures semées

Synthèse bibliographique sur la phase d'implantation des cultures et développement d'un modèle conceptuel

Immédiatement après ma prise de fonction en septembre 2017, j'ai effectué une recherche bibliographique approfondie pour recueillir toutes les informations clés sur les facteurs abiotiques et biotiques ainsi que sur les pratiques agricoles qui influent sur la germination des semences et la levée des plantules (**ACL 24**). Sur la base de ces informations, j'ai développé un cadre conceptuel (**Figure 14**) qui constitue la feuille de route de mes activités recherche.

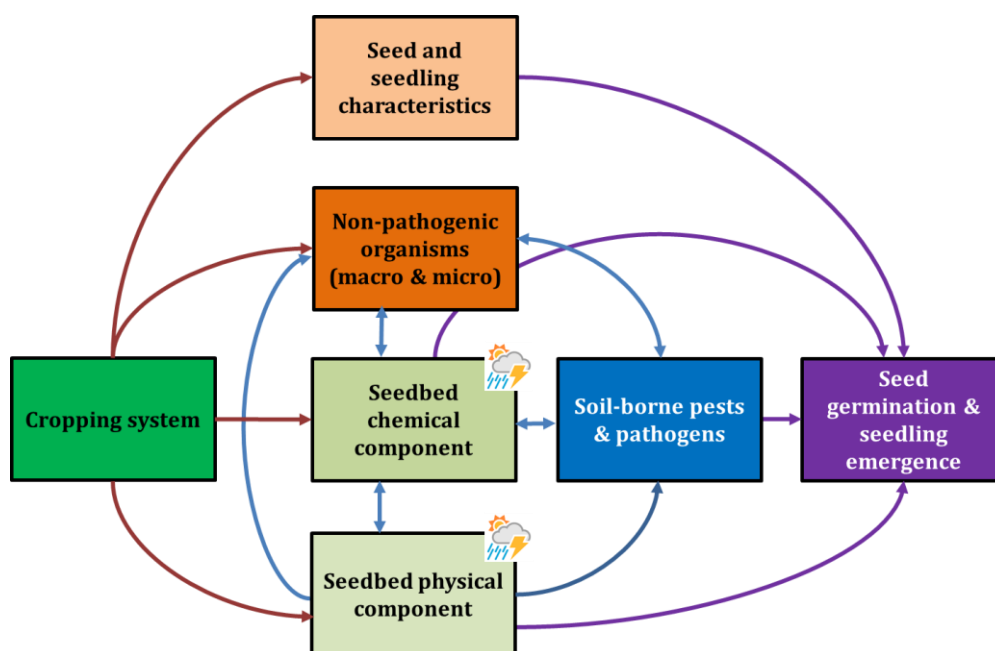


Figure 14. Schéma conceptuel décrivant les facteurs biotiques et abiotiques ainsi que les éléments du SDC affectant la germination des semences et la levée des plantules. En plus de l'impact individuel de chaque facteur, la germination des semences et la levée des plantules sont affectés par les interactions entre deux ou plusieurs facteurs (**ACL 24**).

Le taux de levée d'une culture semée est affecté par trois groupes de facteurs : facteurs déterminants, facteurs limitants et facteurs de réduction (**Figure 15**). Les caractéristiques des semences (par exemple, la masse ou la taille de la graine, l'épaisseur du tégument, le niveau de dormance des semences, le microbiote des semences, la localisation de la réserve de semences) sont les facteurs déterminants. Une variété déjà enregistrée (et donc sélectionnée) doit, *a priori*, présenter des caractéristiques optimales, bien que ces caractéristiques puissent différer sensiblement entre géotypes d'une même espèce et conduire à des taux de germination et de levée différents dans des mêmes

conditions environnementales. Les facteurs limitants et réducteurs, sont quant à eux affectés par le SDC (par exemple, le type et les caractéristiques du travail du sol ; la date, la densité et la profondeur de semis ; la présence ou l'absence de résidus de culture à la surface du sol, le niveau de diversification de la succession culturale), et les caractéristiques du lit de semences (e.g. la température, l'humidité, la taille et la répartition spatiale des agrégats du sol). Dans la pratique, un certain nombre de facteurs limitent (e.g., les stress thermiques, hydriques et chimiques, et les stress mécaniques tels que la présence d'une croûte de battance) ou réduisent (e.g., les ravageurs, granivores et herbivores, et les agents pathogènes transmis par le sol et / ou par les semences, les adventices) le taux de germination et de levée des cultures semées.

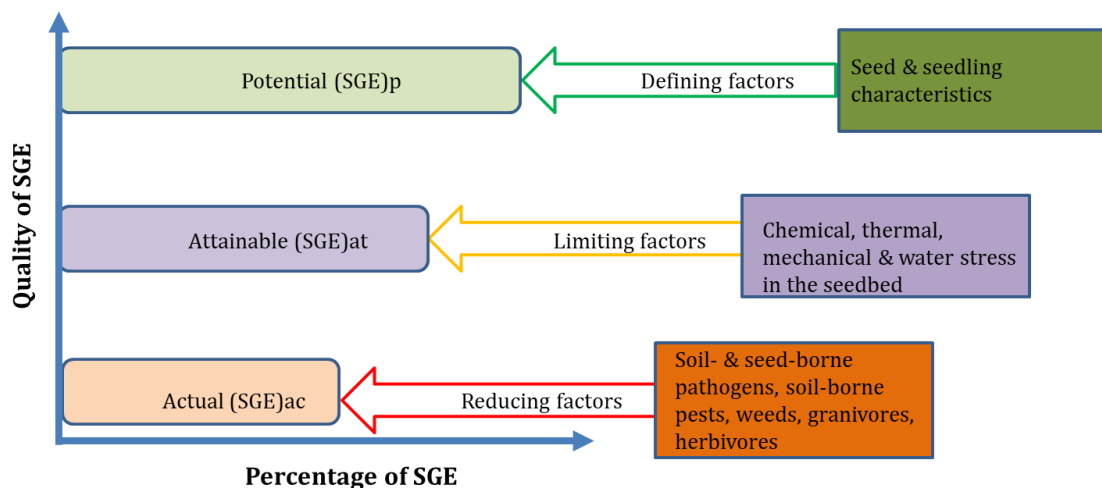


Figure 15. Les trois types de facteurs affectant le taux de germination des semences et la levée des plantules (*Seed Germination and Emergence*, SGE). L'écart entre le taux potentiel et le taux réel de levée des plantules est défini par ces trois facteurs (**ACL 24**).

Bilan

Cette revue de la littérature a constitué pour moi une véritable première étape dans la compréhension des facteurs clés affectant la germination des semences et la levée des plantules. Ce travail, à travers un état de l'art détaillé sur le sujet, m'a également permis de comprendre les lacunes actuelles de la recherche sur ce sujet. En effet, toutes les composantes clés du lit de semence et leurs interactions avec le climat affectant la germination des semences et la levée des plantules n'avaient pas été prises en compte par les recherches précédentes. Cela m'a permis de proposer un modèle conceptuel sur mon sujet de recherche en considérant tous les facteurs clés et leurs interactions affectant la germination des semences et la levée des plantules. Cette formalisation, nouvelle pour moi, me donna l'occasion de saisir l'importance du rôle des modèles conceptuels dans les projets de recherche.

Etudes de la qualité d'implantation de betterave à sucre par simulation

Les modèles de cultures peuvent être déployés pour étudier la performance d'une culture donnée dans différentes conditions pédo-climatiques, y compris dans le cadre du changement climatique futur. De manière plus spécifique à la phase d'implantation, le modèle d'émergence SIMPLE (**Figure 16**) peut être utilisé pour évaluer comment la qualité d'implantation des cultures va évoluer, non seulement dans une région où la culture est déjà cultivée, mais aussi pour explorer de nouvelles zones où une culture donnée pourrait être mise en place de manière innovante en raison du changement climatique en cours.

Dans les deux cas, l'utilisation du modèle SIMPLE peut aider à comprendre quels seront les marges d'optimisation des choix techniques pour l'agriculteur, notamment sur les choix de la date de semis, de la profondeur de semis et de l'état structural du lit de semence à atteindre. Pour atteindre cet objectif, trois étapes clés sont nécessaires : i) le paramétrage du modèle, ii) l'évaluation de sa qualité de prédiction pour la culture à étudier, et iii) l'identification des conditions microclimatiques au sein du lit de semences (en particulier la température et l'humidité à différentes profondeurs du sol). Concernant les deux premiers points, le modèle SIMPLE a été paramétré et évalué de manière satisfaisante pour différentes espèces cultivées comprenant la betterave à sucre (Dürr et al. 2001), la moutarde (Dorsainvil et al. 2005), le haricot (Moreau-Valancogne et al. 2008), le colza (Dürr et al. 2016) et quelques CIMS (Constantin et al. 2015). Quant au troisième point, le modèle de culture STICS (Brisson et al. 1998), qui comporte un module sol, peut être utilisé pour générer les conditions climatiques du lit de semences des sites à étudier grâce aux différents scénarios RCP correspondant à différentes hypothèses de forçage radiatif (Moss et al. 2010).

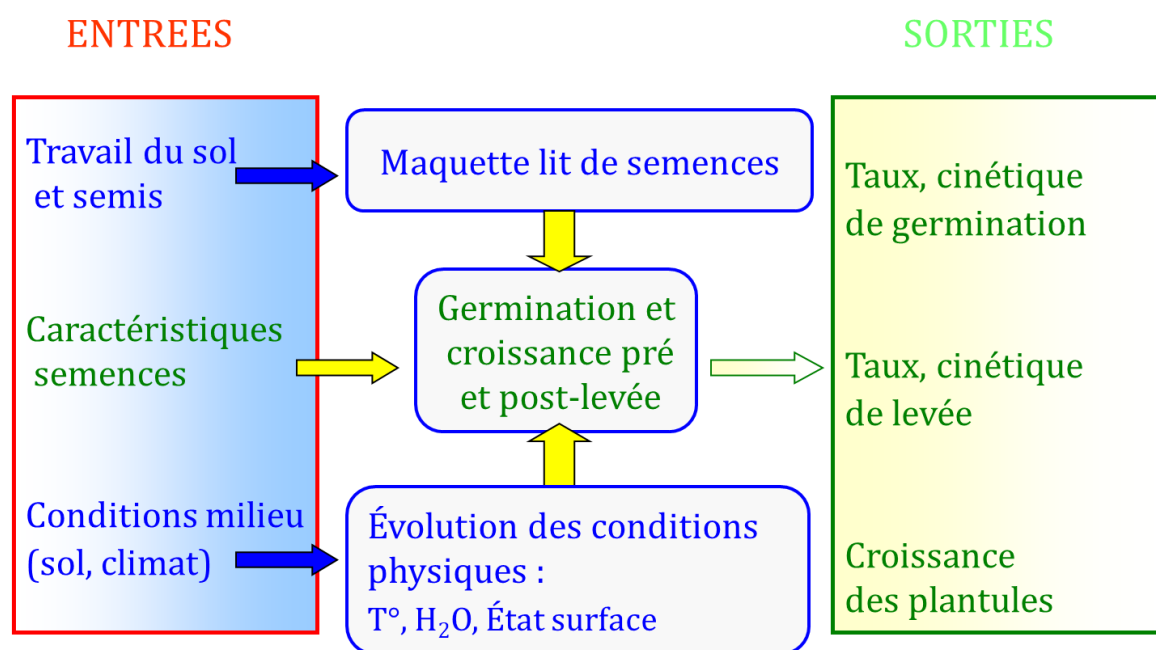


Figure 16. Principes de fonctionnement du modèle SIMPLE (Dürr et al. 2001).

Pour la première fois, j'ai réalisé une étude de simulation pour déterminer comment les conditions du lit de semence de la betterave à sucre des huit prochaines décennies seront modifiées par le changement climatique et comment ces variations modifieront la germination et la levée, ainsi que les taux de croissance précoces de cette culture. Par simulation, il a été possible de déterminer les meilleures stratégies d'adaptation des dates de semis. J'ai choisi le nord de la France comme site d'étude représentatif du bassin de culture de la betterave sucrière en Europe du Nord. J'ai démontré que, en utilisant le scénario le plus pessimiste (RCP +8.5 (Moss et al. 2010), entre 2020 et 2100, la température des lits de semences augmentera de 2 °C après 2060, tandis qu'aucun changement dans les précipitations cumulées ne devrait être observé avant et après les semis, par rapport à la période de référence 2000-2019 (**ACL 20**). Le taux d'émergence devrait généralement être plus élevé pour la période 2081-2100 (**Figure 17**), tandis que le temps nécessaire pour atteindre le taux d'émergence maximal devrait diminuer d'environ une semaine, par rapport aux autres périodes (2020-2080), en

raison de températures moyennes plus élevées des lits de semences. Le taux de non-germination a diminué, surtout pour les dates de semis les plus précoces, mais la fréquence de non-émergence due au stress hydrique devrait augmenter après 2060 pour toutes les dates de semis, y compris la plus précoce (celle de la mi-février).

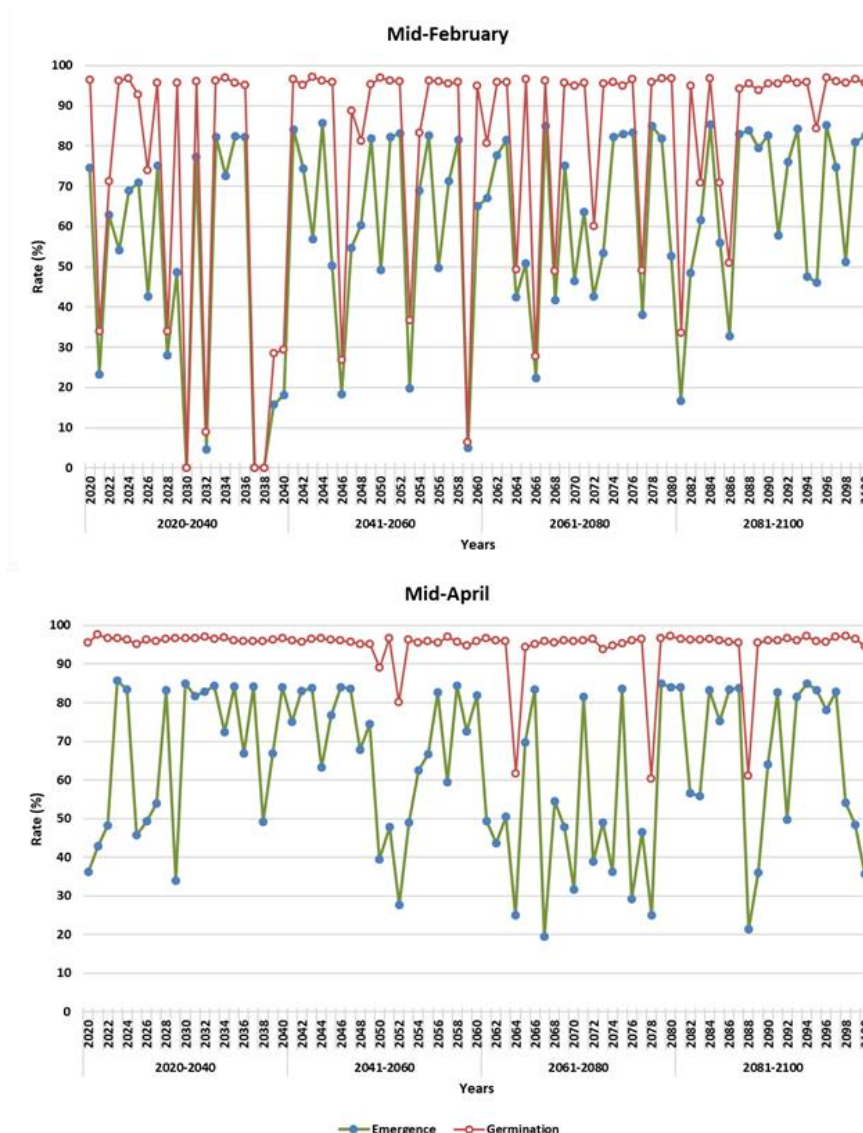


Figure 17. Variabilité des taux de germination et d'émergence de la betterave à sucre à Estrées-Mons (49°52'44"N 3°00'27"E) d'année en année selon la date de semis dans le cadre du scénario climatique futur en utilisant le scénario le plus pessimiste (RCP +8.5 ; (ACL 20).

J'ai aussi démontré que la montée en graine restait un risque pour les semis avant la mi-mars, mais que ce risque serait nettement réduit après 2060. Les changements de conditions microclimatiques des lits de semences ne seront réellement significatifs qu'après 2060 en ce qui concerne les températures. Toutefois, la possibilité d'accéder aux parcelles sera l'un des principaux facteurs limitant pour les semis précoces, car aucun changement significatif des précipitations cumulées, par rapport au passé, ne devrait être observé dans le cadre du futur climat. Lorsque l'accès aux parcelles n'est pas une contrainte, une anticipation de la date de semis, par rapport aux semis actuellement pratiqués (c'est-à-dire à la mi-mars), entraînera une diminution des risques pour l'implantation de la betterave à sucre et la montée en grain (**Tableau 5**).

Tableau 5. Taux de montée en graines (moyennes $\pm$ écart-type), sans l'effet de la dévernalisation, et fréquence lorsqu'ils sont analysés par date de semis pour chaque période de 20 ans et leur interaction et la dévernalisation potentielle due à des températures élevées (7 jours avec Tmax > 25°C) 60 à 120 jours après le semis. TMG : Taux de montée en graines potentiel ; FTMG : Fréquence des taux de montée en graines potentiel; NJTmax : Nombre de jours avec Tmax > 25°C, 60-120 jours après le semis.

Date de semis	Periode	TMG (%)	FTMG (%)			NJTmax
			<0.5%	0.5-1%	>1%	
Mi-fevrier	2020-2040	1.65 ^b $\pm$ 0.59	0	3	18	3 ^a $\pm$ 3
	2041-2060	1.60 ^b $\pm$ 0.76	2	2	16	4 ^{ab} $\pm$ 6
	2061-2080	0.97 ^a $\pm$ 0.41	4	5	11	7 ^{ab} $\pm$ 4
	2081-2100	0.79 ^a $\pm$ 0.54	7	8	5	8 ^b $\pm$ 7
1 ^{er} Mars	2020-2040	0.89 ^b $\pm$ 0.38	3	9	9	4 ^a $\pm$ 4
	2041-2060	0.88 ^b $\pm$ 0.52	5	7	8	7 ^{ab} $\pm$ 7
	2061-2080	0.47 ^a $\pm$ 0.26	12	8	0	13 ^{bc} $\pm$ 7
	2081-2100	0.40 ^a $\pm$ 0.33	13	6	1	15 ^c $\pm$ 9
Mi-mars	2020-2040	0.40 ^b $\pm$ 0.21	16	5	0	6 ^a $\pm$ 6
	2041-2060	0.40 ^b $\pm$ 0.28	13	6	1	13 ^{ab} $\pm$ 8
	2061-2080	0.17 ^a $\pm$ 0.13	20	0	0	20 ^{bc} $\pm$ 10
	2081-2100	0.16 ^a $\pm$ 0.17	19	1	0	23 ^c $\pm$ 12
1 ^{er} avril	2020-2040	0.11 ^{bc} $\pm$ 0.08	21	0	0	8 ^a $\pm$ 8
	2041-2060	0.13 ^c $\pm$ 0.14	19	1	0	17 ^{ab} $\pm$ 10
	2061-2080	0.04 ^{ab} $\pm$ 0.05	20	0	0	26 ^{bc} $\pm$ 12
	2081-2100	0.02 ^a $\pm$ 0.03	20	0	0	32 ^c $\pm$ 12
Mi-avril	2020-2040	0.02 ^{ab} $\pm$ 0.02	21	0	0	13 ^a $\pm$ 11
	2041-2060	0.03 ^b $\pm$ 0.04	20	0	0	26 ^b $\pm$ 12
	2061-2080	0.01 ^{ab} $\pm$ 0.01	20	0	0	33 ^{bc} $\pm$ 12
	2081-2100	0.00 ^a $\pm$ 0.01	20	0	0	42 ^c $\pm$ 11
Dates de semis X Perodes	Df	12				12
	Significativité	***				***

Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes entre les dates ou les périodes de semis ; ***P < 0,001 ; **P < 0,01 ; *P < 0,05 ; NS : non significatif.

Bilan

Les résultats présentés ici sont les premiers que j'ai obtenus en mobilisant des simulations issues d'un modèle mécaniste. Ce travail a été particulièrement intéressant pour moi car il était basé sur le couplage entre deux modèles : STICS pour générer les données microclimatiques du lit de semences, et SIMPLE. Le travail réalisé, en collaboration avec d'autres collègues, m'a également permis de maîtriser le modèle SIMPLE, ainsi que de mieux en cerner les forces et les faiblesses pour mes recherches. En utilisant des scénarios climatiques futurs, ce travail a permis de comprendre comment la qualité de l'implantation de la betterave sucrière allait évoluer tout au long du 21^{ème} siècle, ce qui constitue un travail de recherche assez original et générique car facilement transposable à d'autres cultures.

Etudes de la qualité d'implantation de soja par expérimentation et simulation

Dans le cadre du projet Sojamip qui a impliqué différents partenaires (Euralis Semences, INRAE, RAGT2n, Terres Inovia, Terres Univia, et Toulouse INP), j'ai mené une étude pour explorer de nouvelles zones potentielles propices à l'implantation du soja (**ACL 18**). Plus précisément, j'ai étudié si le soja pouvait être implanté dans le nord de la France, une zone de production totalement nouvelle pour cette culture. De plus, j'ai étudié si la qualité d'implantation serait affectée par le changement climatique en cours. En effet, une réintroduction de soja est l'une des priorités des politiques publiques française et européenne, non seulement pour réduire la dépendance aux importations de cette culture, mais aussi pour satisfaire la demande de protéagineux produits localement et non génétiquement modifiés (Bertheau and Davison 2011; Watson et al. 2017). Contrairement à la betterave à sucre, le modèle SIMPLE n'était pas paramétré pour le soja. J'ai donc mené ce travail en trois phases : paramétrage du modèle SIMPLE pour le soja (**Figure 18 ; Tableau 6**), évaluation de sa qualité des prédictions (**Figure 19**), et simulations dans le cadre du changement climatique futur (**Figure 20**). Nous avons choisi la commune d'Estrées-Mons (49°52'44"N 3°00'27"), située dans le nord de la France, comme zone représentative du climat dans la partie nord de l'Europe, où le soja n'est pas encore cultivé mais pourrait l'être suite au changement climatique.

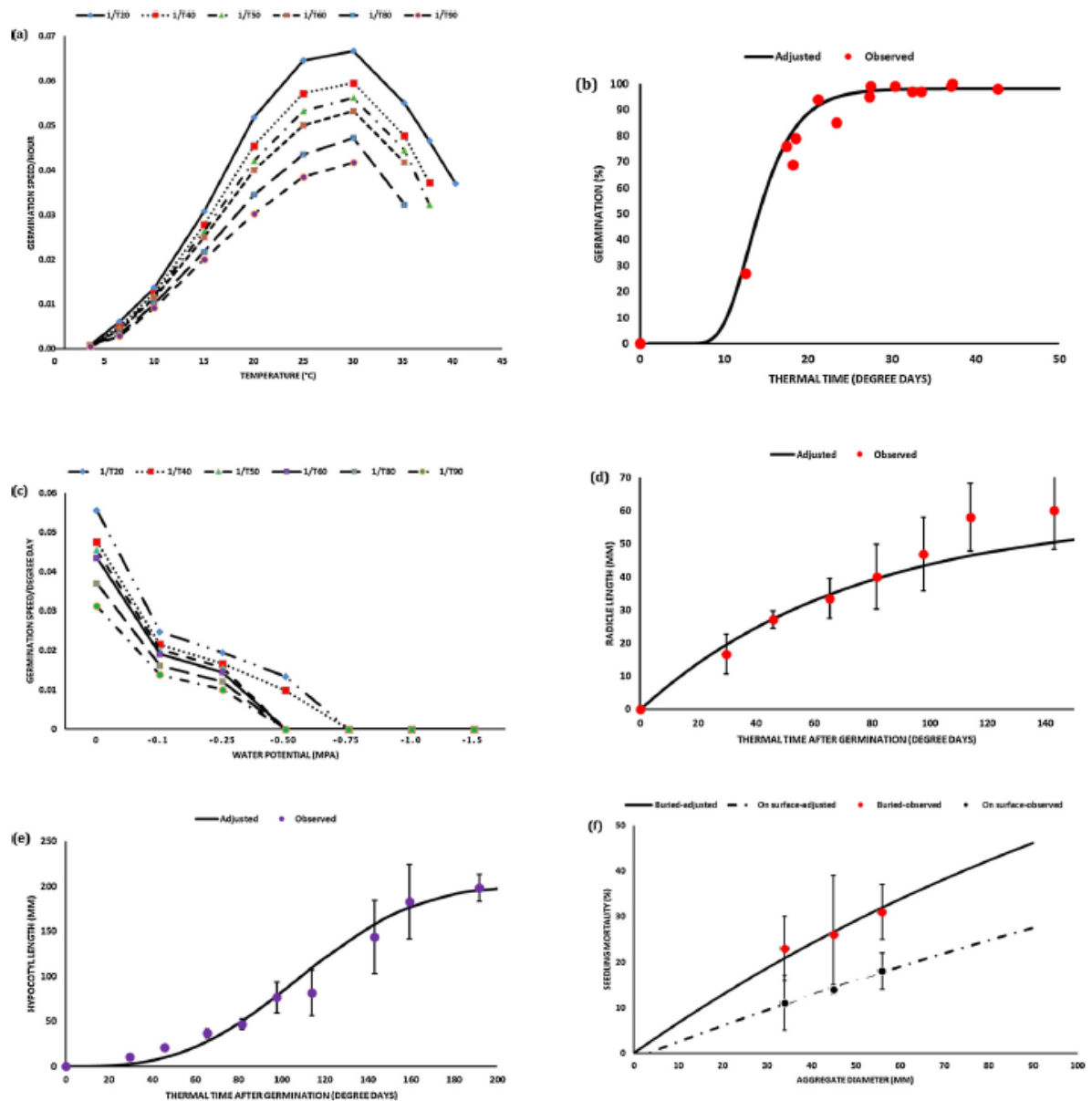


Figure 18. Mesure de la vitesse de germination des semences de soja à 3.5, 6.5, 10, 15, 20, 25, 30, 34.5, 37 et 40 °C (a) ; valeurs moyennes de la dynamique de germination obtenue dans la partie linéaire de la figure 1a (c'est-à-dire observée à 10, 15, 20 et 25 °C) en fonction du temps thermique (température de base : 4.0 °C) (b) ; du potentiel hydrique pour la germination des semences (c) ; l'élongation de la radicule (d) et de l'hypocotyle (e) ; et la mortalité des plantules sous mottes de différentes tailles ainsi que de distribution spatiale (f) à 20 °C dans des conditions de laboratoire. Les barres verticales représentent les écarts-types, tandis que $1/T_{20}$, $1/T_{40}$, $1/T_{50}$, $1/T_{60}$, $1/T_{80}$ et $1/T_{90}$ indiquent la vitesse de germination pour atteindre 20, 40, 50, 60, 80 et 90% germination, respectivement (ACL 18).

Tablau 6. Valeurs des paramètres du modèle SIMPLE pour le soja, obtenues par expérimentations en conditions contrôlées (ACL 18).

Parameter	Value	Unit
Germination		
Base temperature, $T_{b,germ}$	4	°C
Germination percentages per thermal time class STT_g		°Cd (%)
5-10	8	
10-15	51	
15-20	29	
20-25	8	
25-35	2	
Residual percentage of non-germinated seeds	2	
Base water potential $\psi_{b,germ}$	-0.67	MPa
Heterotrophic growth		
Base temperature for elongation $T_{b,elon}$	4	°C
Parameters of the Weibull elongation function		
(i) for hypocotyl		
a	200	mm
b	0.0081	°C ⁻¹ d ⁻¹
c	3	
(ii) for radicle		
v	0.58	mm °C ⁻¹ d ⁻¹
Mechanical obstacles - clods		
Parameters of the probability function of seedling death under clod		
(i) Buried clods		
α_b	0.0069	mm ⁻¹
L_{0b}	0	mm
ii) Clods laid on the soil surface		
α_{ss}	0.0037	mm ⁻¹
L_{0ss}	3	mm
Mechanical obstacles - soil surface crust		
Probability (p) for a seedling to emerge through a dry crust	60	%
Daily rain threshold causing the appearance of a crust	5	mm
Cumulative rain-threshold causing the appearance of a crust	12	mm
Daily rain threshold causing humidification of the crust during the last 3 days	3.5	mm

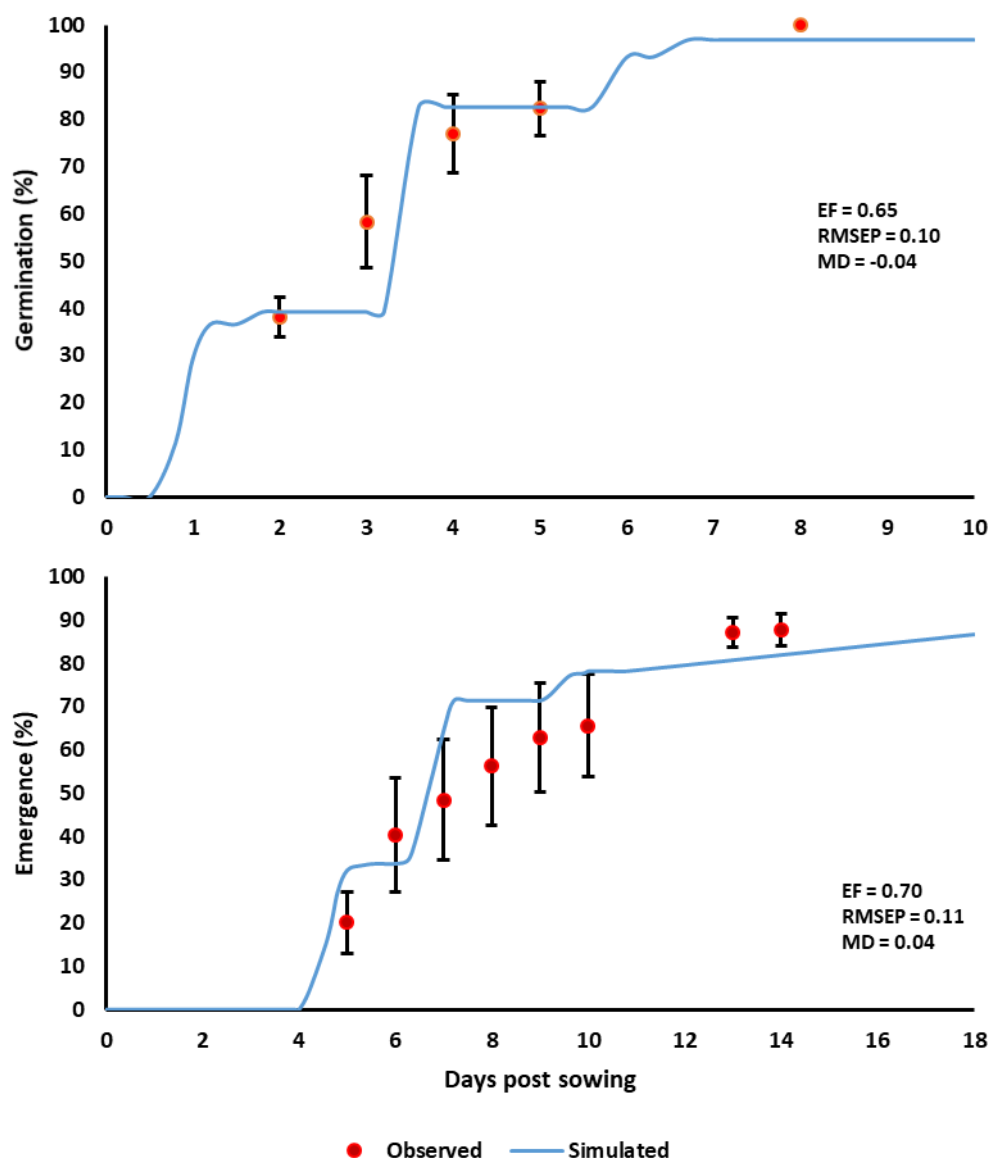


Figure 19. Valeurs simulées et observées des taux de germination des semences et de levée des plantules de soja sur le site expérimental d'Auzeville, Toulouse, en 2018. Les barres verticales représentent les écarts-types. Le modèle a finement prédit les taux de germination et de levée, comparés à l'ensemble des données observées, comme l'indiquent les trois critères statistiques utilisés pour l'évaluation du modèle : EFF, Efficience ; RMSEP : racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error of Prediction*) ; MD : biais (ACL 18).

J'ai démontré que les taux moyens de levée du soja variaient de 72 à 78 % pour les semis de la mi-mars, de 66 à 76 % pour les semis du 1^{er} avril et de 61 à 76 % pour les semis de la mi-avril, sur une période de 20 ans. Aucune différence statistiquement significative, en termes de taux de levée moyen entre les périodes (2020-2100) et les dates de semis (de la mi-mars à la mi-avril), n'a été constatée. La fréquence des mauvais taux de levée (<50%) varie de 0 à 25% en fonction de la date de semis et de la période. Dans l'ensemble, j'ai montré que la qualité d'implantation du soja sur ce site d'étude, qui est actuellement le principal bassin de production de la betterave sucrière, sera meilleure que celle de la betterave sucrière et que le changement climatique sera favorable à l'implantation du soja dans les conditions de cette zone du nord de l'Europe (ACL 18).

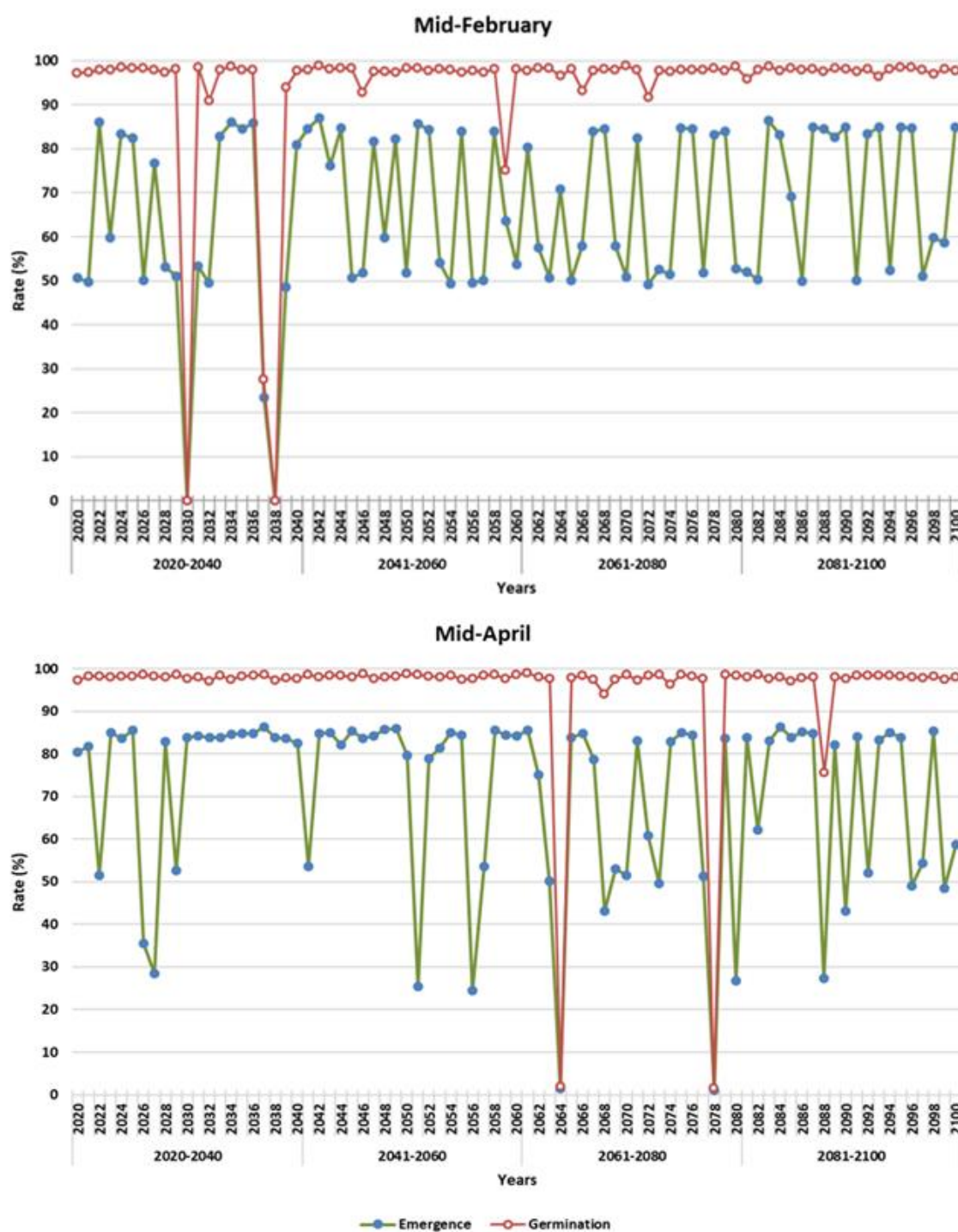


Figure 20. Variabilité des taux de germination et d'émergence de soja à Estrées-Mons (49°52'44"N 3°00'27"E) d'année en année selon la date de semis dans le cadre du scénario climatique futur en utilisant le scénario le plus pessimiste (RCP +8.5 ; ACL 24).

J'ai mené une autre étude pour mieux comprendre les interactions entre le cultivar x la date de semis x l'environnement sur la qualité de l'implantation du soja et pour faire la lumière sur les corrélations potentielles entre la qualité d'implantation de cette culture et le rendement (**ACL 13**). J'ai utilisé une base de données issue d'une expérimentation de deux ans au champ qui comprenait la dynamique de levée de trois cultivars de soja de différents groupes de maturité, avec des dates de semis précoces et conventionnelles sur trois sites. Les taux d'émergence finaux dans des conditions de terrain varié de 62 % à 92 % et de 51 % à 94 % pour les semis précoces et conventionnels, respectivement (**Figure 21**). Des différences dans les taux de levée finaux ont été constatées, non seulement entre les cultivars, mais également entre les sites d'études pour le même cultivar. Le rendement moyen en grains variait de 3,1 à 4,0 t ha⁻¹ et était significativement affecté par le régime d'irrigation ($p < 0,001$) et l'année ($p < 0,001$), mais pas par les sites, la date de semis ou les cultivars. J'ai montré que les semis précoces ne risquaient pas d'affecter la levée du soja dans le Sud-Ouest de la France et qu'ils pouvaient donc représenter un levier agronomique intéressant pour échapper à la sécheresse estivale qui limite fortement le rendement du soja dans cette région.

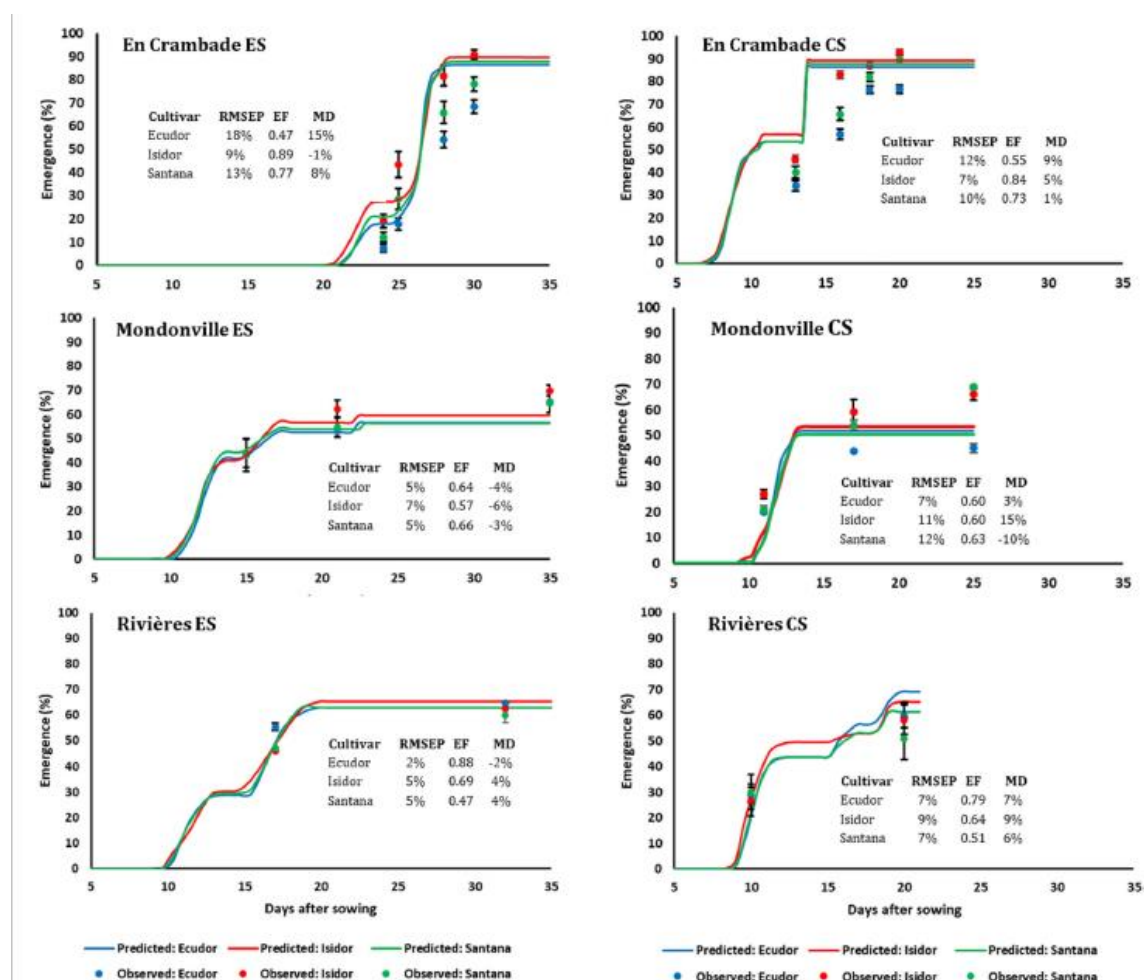


Figure 21. Simulations et observations des cinétiques de levée de trois cultivars de soja pour des dates de semis précoces (ES, *Early Sowing*) et conventionnelles (CS, *Conventional Sowing*) sur trois sites, en 2013. Les barres verticales représentent les écarts types ($n = 9$). EF, efficacité du modèle ; RMSEP (*Root Mean Square Error of Prediction*), erreur quadratique moyenne de prédiction ; MD (Mean Deviation), biais.

Bilan

Le paramétrage, l'évaluation de la qualité de prédiction de SIMPLE, et la simulation sous un scénario climatique futur réalisées dans ce travail sont très originales car aucune étude n'a été menée à ce jour pour étudier la qualité d'implantation du soja dans le cadre d'un scénario climatique futur. Par ailleurs, le soja est une légumineuse d'une importance agronomique et socio-économique croissante en France et en Europe. Il est nécessaire de développer des outils pour analyser la faisabilité de l'expansion du soja du sud vers le nord de la France et de l'Europe. Dans ce but, l'utilisation de l'approche de modélisation développée ici peut représenter une première étape pour identifier les zones les plus appropriées à la culture du soja, au moins en termes de qualité d'implantation.

Développement d'un modèle qualitatif pour étudier la phase d'implantation

La phase d'implantation comprend trois périodes (**CU 1**): du semis à la germination des semences, de la germination des semences à la levée des plantules, et de la levée des plantules à la compétition initiale entre les jeunes plantes (**Figure 22**). Les deux premières périodes sont hétérotrophes, ce qui signifie que le développement de la radicule et de l'hypocotyle / coléoptile repose sur les réserves présentes dans la semence, tandis que la dernière période est autotrophe, ce qui signifie que les plantules ont déjà développé les premières paires de vraies feuilles qui sont capables d'effectuer la photosynthèse et ne dépendent donc plus des réserves de graines déjà épuisées.

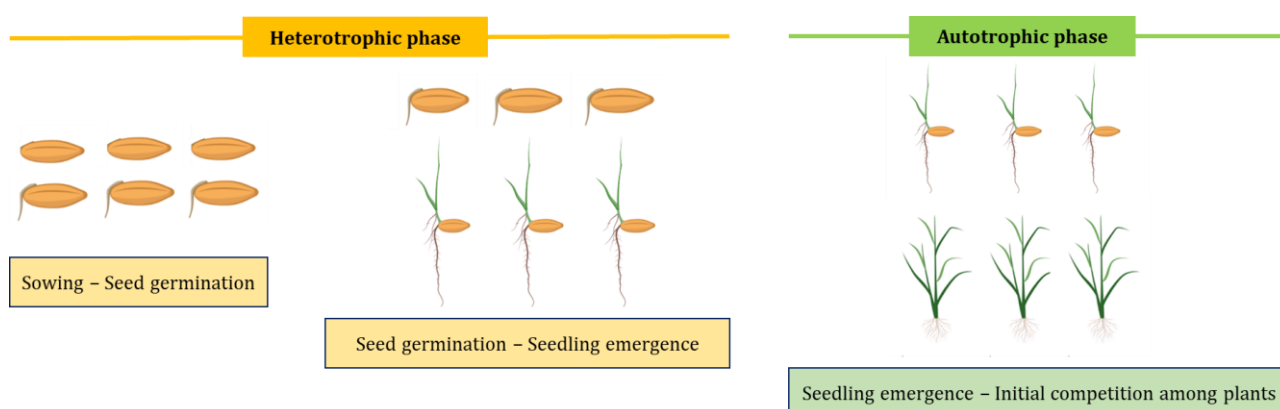


Figure 22. Les trois périodes structurant la phase d'implantation des cultures (**ACL 1**)

Bien que ma thématique de recherche concerne principalement l'analyse et la modélisation des déterminants biotiques et abiotiques de la levée des cultures semées, j'ai ajouté une période supplémentaire à mon modèle conceptuel initial (**Figure 23a**) allant de la levée à la compétition initiale entre les jeunes plantes (**Figure 23b**). Ce choix était principalement fondé sur le fait que cette période est déterminante pour une bonne qualité d'implantation de cultures car de nombreux stress biotiques -- agents pathogènes (Rojas et al. 2016; M P You et al. 2017; Ming P You et al. 2017; Serrano and Robertson 2018) et ravageurs telluriques (van Herk and Vernon 2013; Radford and Allsopp 1987) ainsi que des ravageurs vertébrés tels que différents oiseaux et mammifères (Firake et al. 2016; Nasu and Matsuda 1976; Dimitri et al. 2012; McKee et al. 2020) et abiotiques tels que le stress hydrique (Constantin et al. 2015; Meeks et al. 2013) -- peuvent entraîner d'importantes pertes de jeunes plantes en post-levée. Cela est particulièrement vrai pour certaines cultures telles que le tournesol (Sausse et al. 2021), le maïs (Furlan et al. 2021; Norgrove 2021) et le soja (**ACL 5**), où les dégâts de post-levée

Les ravageurs vertébrés représentent les stress les plus importants pour l'implantation des cultures. Les agents pathogènes transmis par l'air ne sont pas inclus dans ce modèle car leur impact sur la croissance et le développement des cultures n'est important qu'après la phase d'implantation des cultures. Tous les agents pathogènes clés affectant cette phase sont transmis par le sol (Rojas et al. 2016; M P You et al. 2017; Ming P You et al. 2017; Serrano and Robertson 2018). De même, les mauvaises herbes sont exclues car leur impact sur la croissance, le développement et le rendement des grandes cultures n'est important qu'après la phase d'implantation des cultures, lorsqu'elles sont suffisamment développées pour concurrencer les cultures pour la lumière et les nutriments (Chauhan and Johnson 2011).

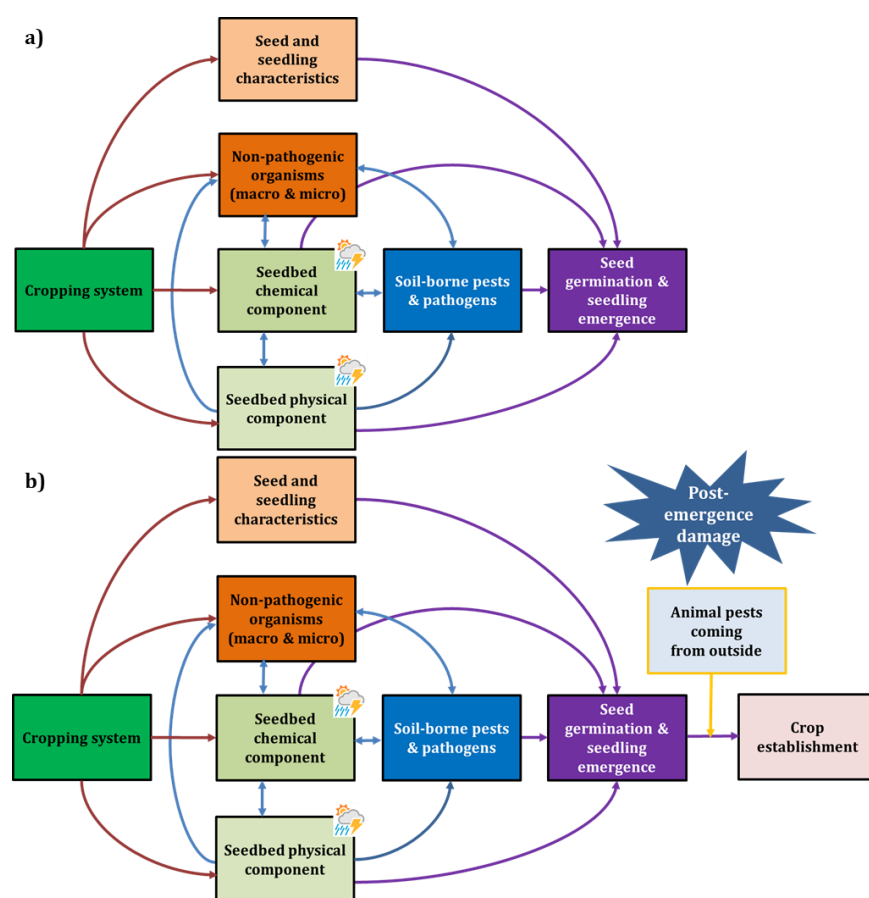


Figure 23. Evolution du modèle conceptuel au cours des trois dernières années. Contrairement à la version précédente du modèle (a) la version mise à jour (b) prend en compte les facteurs abiotiques et biotiques ainsi que les pratiques culturales affectant les jeunes plantules de l'émergence jusqu'au début de la compétition entre elles (ACL 14).

Étant donné le très grand nombre de facteurs abiotiques et biotiques qui influent sur la phase d'implantation, tant en pré- qu'en post-émergence, il est important de développer un modèle qui prenne en compte ces facteurs clés et leurs interactions. Alors que le modèle SIMPLE prend en compte les facteurs abiotiques clés qui affectent la germination des semences et la levée des plantules, il présente trois limites essentielles : i) il ne tient pas compte des stress biotiques ; ii) la troisième période de la phase d'implantation n'est pas prise en compte par SIMPLE ; et iii) il ne peut pas valoriser les connaissances expertes. Par conséquent, il est important de développer un modèle qui prenne en compte ces différents aspects pour étudier la phase d'implantation des cultures. Cependant, aucune

base de données n'est disponible à ce jour pour permettre le développement d'un modèle quantitatif en général, et d'un modèle mécaniste en particulier. On peut alors considérer le développement et l'utilisation d'un modèle plus simple qui bénéficie de différentes données expérimentales et observationnelles, en plus des informations disponibles dans la littérature scientifique et technique publiée, des modèles de simulation existants et des connaissances d'experts. C'est dans pour quoi j'ai développé un modèle qualitatif appelé CESIM (ACL 14 ; Figure 24).

Attribute	Scale
Crop establishment (%)	Low (<40); Moderately low (40-60); Moderately high (60-80); High (>80)
Seedling emergence (%)	Low (<50); Medium (50-70); High (>70)
Seed germination (%)	Low (<70); Medium (70-90); High (>90)
Seed characteristics	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Seed mass	Small; Medium; Large
Treatment	Nil-low effectiveness; High effectiveness
Germination ability	Low; Medium; High
Seedbed characteristics	Unfavorable; Favorable
Moisture	Unfavorable; Favorable
Temperature	Unfavorable; Favorable
Seed predation	High; Low
Seedling characteristics	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Emergence force	Low; Medium; High
Shootroot elongation rate	Low; Medium; High
Seedbed characteristics	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Physical characteristics	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Temperature	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Moisture	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Rainfall	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Texture	Unfavorable; Favorable
Evapotranspiration	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Crusting	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Rainfall	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Texture	Unfavorable; Favorable
Evapotranspiration	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Structure	Unfavorable; Favorable
Crop residue management	Unfavorable; Favorable
Chemical characteristics	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Organic matter	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Inorganic nutrients	Unfavorable; Favorable
pH	Unfavorable; Favorable
Biological characteristics	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Disease index (%)	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Oomycetes	Unfavorable; Favorable
True fungi	Unfavorable; Favorable
Risk of animal pests	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Invertebrate pests	Unfavorable; Favorable
Vertebrate pests	Unfavorable; Favorable
Sowing density	Unfavorable; Favorable
Crop rotation	Unfavorable; Favorable
Crop residue management	Unfavorable; Favorable
Sowing depth	Poor; Average; Optimal
Stand uniformity (%)	Low (<50); Medium (50-80); High (>80)
Seedbed physical characteristics	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Moisture	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Temperature	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Seedbed chemical characteristics	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Organic matter	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Inorganic nutrients	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
pH	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Seedbed biological characteristics	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Disease Index	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Oomycetes	Unfavorable; Favorable
True fungi	Unfavorable; Favorable
Risk of animal pests	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Invertebrate pests	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Vertebrate pests	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable
Crop compensation capacity	Unfavorable; Moderately favorable; Favorable

Figure 24. Structure et échelles des attributs du modèle CESIM (capture d'écran du logiciel DEXi). Les échelles sont classées des valeurs défavorables (à gauche) à favorables (à droite) pour l'implantation des cultures. Cette différence est clairement perceptible dans le logiciel DEXi, car, par convention, les valeurs favorables à l'utilisateur sont colorées en vert, les valeurs défavorables en rouge et les valeurs neutres en noir (ACL 14).

Le développement du CESIM a été réalisé à l'aide du logiciel DEXi (<https://kt.ijs.si/MarkoBohanec/dexi.html>), développé par l'institut Jožef Stefan (Slovénie), avec qui l'équipe collabore régulièrement. CESIM prend en compte les pratiques culturales, les caractéristiques des semences et des plantules, les composantes du lit de semence (physiques, chimiques et biologiques) et le climat, ainsi que leurs interactions. Toutes ces variables ont été intégrées dans un réseau hiérarchique qualitatif agrégé pour prédire la qualité d'implantation des cultures. CESIM compte 38 attributs de base (variables d'entrée) et 20 attributs agrégés (19 variables d'état et 1 variable de sortie) pour un total de 58 attributs (**Figure 24**). La qualité de prédiction du modèle a été évaluée avec succès pour un ensemble de données provenant d'Australie sur la qualité d'implantation du trèfle souterrain (**Figure 25**).

		Simulated				Total
		Low	Mod. low	Mod. high	High	
Observed	Low	205 89.1	17 7.39	0 0	0 0	222 96.5
	Mod. low	3 1.30	5 2.17	0 0	0 0	8 3.48
	Mod. high	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
	High	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
	Total	208 90.4	22 9.57	0 0	0 0	230 100.

Figure 25. Matrice de confusion du modèle CESIM-Trèfle souterrain et distributions marginales. Les nombres en italique indiquent les pourcentages globaux calculés comme le rapport entre le nombre de cas dans une situation donnée, ou les sommes marginales, et le nombre total d'observations $\times 100$ ($n = 231$). Les codes couleur vert et rouge indiquent respectivement la différence minimale (aucune erreur) et maximale (3 classes d'écart) entre les valeurs observées et simulées. Les couleurs intermédiaires ont été définies automatiquement avec l'option ColorFunction de Mathematica (Wolfram Research, Inc. 2015), en fonction du nombre de classes considérées (quatre dans le cas présent). Les abréviations "Mod. Low" et "Mod. High" correspondent respectivement aux classes modérément basses et élevées (**ACL 14**).

Bilan

Le développement de CESIM représente un réel premier pas vers la prise en compte simultanée de facteurs biotiques et abiotiques clés, ainsi que de pratiques agricoles affectant la qualité d'implantation des grandes cultures. La prise en compte d'un nombre aussi élevé de facteurs n'aurait pas été possible avec un modèle mécaniste, car il existe de fortes lacunes de connaissances sur les processus biotiques avant et après l'émergence. Par conséquent, ce modèle peut être utilisé de manière complémentaire à SIMPLE, bien qu'il s'agisse de deux modèles basés sur des approches complètement différentes (l'un est mécaniste et quantitatif, l'autre est qualitatif). De plus, étant donné sa simplicité, CESIM peut être utilisé par différents utilisateurs, chercheurs, conseillers agricoles, agriculteurs et étudiants.

Bilan global

Bien que plusieurs travaux de recherche antérieurs aient amélioré notre compréhension des facteurs clés affectant la phase d'implantation des grandes cultures, aucun d'entre eux n'a pris en compte les facteurs abiotiques et biotique de manière concomitante. Par conséquent, une analyse basée uniquement sur la prise en compte des facteurs abiotiques uniquement ou biotiques uniquement peut facilement surestimer la qualité d'implantation des cultures semées. Il est donc nécessaire d'étudier à la fois les facteurs biotiques et abiotiques ainsi que leurs interactions, ce qui exige une recherche interdisciplinaire faisant appel à des compétences de différents domaines scientifiques : phytopathologie, agronomie, science du sol, écologie microbienne du sol et entomologie. Bien qu'il s'agisse d'un défi, c'est également une réelle opportunité pour moi de travailler au sein de projets de recherche interdisciplinaires en collaboration avec des collègues ayant des expertises différentes de la mienne. Les compétences que j'ai acquises dans un certain nombre de disciplines et les différentes approches que j'ai utilisées au cours des 15 dernières années (**Figure 26**) faciliteront certainement mes interactions avec ces collègues pour atteindre mes objectifs de recherche.

De plus, la plupart, voire la totalité, des recherches précédentes sur la phase d'implantation ont été menées dans le cadre de SDC conventionnels caractérisés par un travail du sol conventionnel, avec une seule espèce cultivée. Il est en fait nécessaire d'étudier la qualité d'implantation des grandes cultures dans des systèmes de culture plus innovants et durables. Dans ce cadre, le chapitre suivant décrit les principaux défis agronomiques et scientifiques auxquels l'agriculture est confrontée aujourd'hui. Je présenterai comment je compte développer mon projet de recherche pour contribuer à la transition agroécologique.

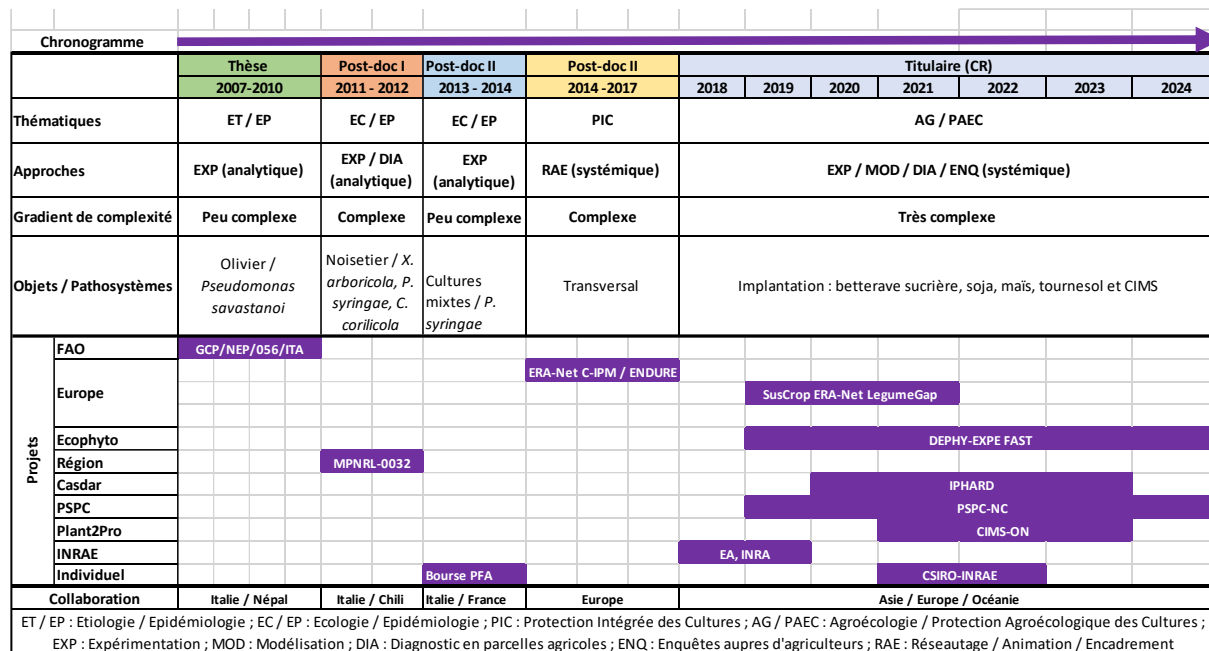


Figure 26. Evolution des activités de recherche en termes de thématiques, d'approches, du gradient de complexité et d'objets de 2007 à ce jour et à court terme

CHAPITRE III : PROJET SCIENTIFIQUE

1. ENJEUX AGRONOMIQUES ET SCIENTIFIQUES

La nécessaire transition agroécologique nécessite d'analyser les principaux facteurs affectant la phase d'implantation de cultures afin de proposer des solutions pour garantir sa réussite dans une large gamme de situations de production et pour différentes cultures. En effet, les systèmes agricoles devront évoluer fortement et mobiliser différentes innovations techniques comme les cultures en relais, les cultures en dérobé, les systèmes en agriculture de conservation, le non traitement des semences, le tout sous l'influence du changement climatique. L'augmentation de la durée annuelle de végétation, les exigences en termes de réduction des pertes d'azote (passant par l'introduction de légumineuses fixatrices d'azote en substitution d'une fertilisation minérale) et de l'érosion des sols, la limitation du recours aux pesticides (plan Ecophyto II+), ainsi que le besoin croissant de production de protéines végétales modifieront profondément le contexte de la production en grandes cultures et ouvrent la voie au développement de nouveaux systèmes de culture, plus diversifiés, plus résilients aux aléas climatiques, produisant des protéines végétales et accroissant la durée de couverture des sols.

Face à ces enjeux, l'adaptation des systèmes de culture constitue une opportunité pour : i) l'intensification écologique avec l'introduction supplémentaire de légumineuses dans la succession des cultures et une augmentation de la durée de couverture du sol en zone vulnérable (effet piège à nitrate, protection contre l'érosion...) ; ii) une augmentation du revenu des agriculteurs par une meilleure valorisation de la surface cultivable et la possibilité de répondre à de nouveaux marchés dans le cadre de la diversification. La mise au point de systèmes de culture innovants pose également un certain nombre de questions scientifiques liées à la phase d'implantation. Par exemple, comment évaluer *ex ante* la qualité d'implantation des cultures semées ? Quel(s) indicateur(s) (vigueur d'émergence, taux d'émergence, autres) pour évaluer la qualité d'implantation ? Un même indicateur peut-il être utilisé à cette fin dans une large gamme de situations de production et pour différentes cultures ? Est-il possible de proposer un OAD permettant d'évaluer et d'optimiser la qualité d'implantation des cultures semées sur la base d'indicateurs agroclimatiques (précipitation cumulée, température moyenne du lit de semences, teneur en argile du sol, etc.), du choix du/des génotype(s) (besoin en temps thermique pour la phase d'implantation) pour différents objectifs, dans différents contextes ? Quelle(s) approche(s) de modélisation est/sont la/les plus adaptée(s) pour étudier la qualité d'implantation des cultures ?

Pour répondre à ces questions, mon projet de recherche se décompose en deux axes principaux. Il vise tout d'abord à étudier les effets de pratiques agroécologiques innovantes sur la qualité d'implantation des cultures semées. Le second objectif est de mieux comprendre les déterminants des communautés microbiennes du sol à la fois pathogènes, bénéfiques et / ou commensaux, afin de proposer des stratégies de gestion *ad hoc* des maladies basées sur PAEC et biocontrôle. L'objectif finalisé de mes recherches est de contribuer à la conception de systèmes de culture agroécologiques.

2. AXE I : ANALYSE DES EFFETS DE PRATIQUES AGROECOLOGIQUES INNOVANTES SUR LA QUALITE D'IMPLANTATION DES CULTURES SEMEES

Cultures en relais

De nombreux systèmes agricoles alternatifs aux systèmes conventionnels peuvent permettre de relever les défis évoqués précédemment (Reganold and Wachter 2016; Knapp and van der Heijden 2018). Une innovation technique prometteuse est la conduite de cultures en relais, ce qui consiste à semer une culture au sein d'une autre culture sur pied avant sa récolte, permettant ainsi aux agriculteurs d'implanter deux cultures au cours de la même année en climat tempéré (Tanveer et al. 2017).

La culture en relais présente de nombreux avantages selon l'espèce choisie pour cette technique, adaptés aux spécificités régionales. Par exemple, faire pousser deux cultures au cours de la même année peut augmenter le rendement net et le ratio d'équivalence de surface (*Land Equivalent Ratio*), en particulier dans les régions où la période de culture est plus courte en raison du changement climatique (Akanvou et al. 2002; Reda et al. 2005; Echarte et al. 2011). La culture en relais peut améliorer la qualité des sols et réduire l'érosion (Barthes et al. 2006; Tanveer et al. 2017), par rapport aux monocultures qui épuisent la fertilité des sols et provoquent leur érosion. La culture en relais permet de contenir la pression des bioagresseurs dans l'agroécosystème, ce qui permet de réduire l'apport de pesticides au sein des systèmes de culture (Parajulee and Slosser 1999; Men et al. 2004; Yu et al. 2018). Enfin, la culture en relais permet une meilleure utilisation de l'humidité résiduelle du sol provenant des cultures précédentes et réduit le coût de production par unité de surface (Zhang et al. 2008; Bandyopadhyay et al. 2016).

Malgré plusieurs avantages documentés dans la littérature, la technique de culture en relais est encore peu adoptée par les agriculteurs. L'une des principales raisons est la mauvaise implantation de la deuxième culture semée dans la première culture sur pied en raison des faibles taux de germination et de levée qui empêchent une levée uniforme de la seconde culture (Keeling et al. 1996; Akanvou et al. 2002; Singer et al. 2006; Queen et al. 2009). Une telle mauvaise qualité d'implantation pourrait être due à plusieurs causes, notamment des problèmes techniques lors du semis (profondeurs de semis très hétérogènes), un mauvais contact sol-semence en raison du semis direct, ou de la concurrence pour l'humidité du sol entre la première et la nouvelle culture (Blunk et al. 2021). Ceci est particulièrement vrai si l'on tient compte des caractéristiques physiques du lit de semences pour une culture en relais, qui sont très différentes par rapport à celles des lits de semences des systèmes conventionnels mobilisant un travail du sol.

Choix des espèces et des méthodes d'étude

Dans un premier temps, c'est le système blé d'hiver (culture principale)-soja (culture en relais) qui a été retenu comme objet d'étude. Ce choix est basé sur l'importance de l'introduction du soja dans les systèmes de culture actuels, fortement dominés par le blé, en particulier dans le sud-ouest de la France, étant donné l'éventail de SE que peut fournir le soja. De plus, la présence de l'UMT PACTOLE sur le pôle toulousain facilite l'interaction entre de nombreux acteurs travaillant sur cette culture.

Questions appliquées

- Quelles sont les variétés de soja les plus adaptées à la culture en relais ?
- Les causes de non-levée sont-elles différentes entre une culture conventionnelle et une culture en relais du soja ?
- La culture en relais du soja est-elle moins favorable aux dégâts de post-levée causés par les ravageurs vertébrés en raison de la présence d'une autre culture ?
- Comment assurer la qualité d'implantation du soja en relais ?

Questions méthodologiques

- Comment déterminer un ensemble de critères (idéotypes) pour sélectionner des variétés de soja pour une culture en relais ?
- Le modèle SIMPLE est-il adapté à l'étude des cultures en relais ? Si ce n'est pas le cas, quelles adaptations pourraient être envisagées ?
- Quels dispositifs mettre en place pour identifier les principaux déterminants des dynamiques de population de ravageurs vertébrés ? Comment mobiliser les connaissances, les concepts et les méthodes d'écologie du paysage pour répondre à cette question ?
- Comment développer un OAD pour améliorer la qualité d'implantation du soja en relais ?

Cultures en dérobé

La culture en dérobé est définie comme la culture de deux cultures successives, sur une même parcelle, pendant la même saison où la deuxième culture est semée après la récolte de la première (Hexen and Boxley 1986). Ce système est un exemple de diversification temporelle visant à accroître l'efficacité d'utilisation des terres arables et le rendement par unité de surface, tout en améliorant les SE (Heaton et al. 2013). La double culture pourrait être une stratégie d'adaptation importante au changement climatique en cours afin de valoriser une période de culture plus longue sur l'année (Graß et al. 2015; Seifert and Lobell 2015). Cette technique est souvent présentée comme une méthode efficace pour accroître la productivité tout en protégeant le sol et en améliorant le stockage du carbone dans le sol (Chataway et al. 2011).

Choix des espèces et des méthodes d'étude

Le système pois d'hiver ou de printemps-tournesol a été identifié comme un bon système pour étudier la culture en dérobé, également appelée « double culture ». L'introduction du tournesol en dérobé pourrait diversifier les systèmes de culture au niveau de la parcelle, de l'exploitation, ou du territoire et pourrait ainsi augmenter la résilience des systèmes conventionnels basés sur la rotation courte blé d'hiver-tournesol (Debaeke et al. 2017). Par exemple, dans les conditions du sud de la France, des variétés de tournesol très précoces pourraient être cultivées après que le pois, le colza ou l'orge aient achevé leur cycle à la fin du printemps.

La culture du tournesol en double culture dans des systèmes simplifiés pourrait toutefois s'avérer difficile, car la culture est très exigeante en termes de qualité de lit de semences pour une implantation réussie (Lecomte and Longueval 2013). Le manque de temps pour la préparation d'un lit de semences fin dans un système en dérobé conduit à une situation où la culture devrait être semée dans un lit de semences dégradé suite à un travail du sol superficiel ou à un déchaumage. Ces conditions peuvent

affecter le contact sol-semence et donc le processus d'imbibition et la germination des semences, ainsi que la levée et l'implantation de la culture (Blunk et al. 2021). Cela peut conduire à un échec partiel ou total de l'implantation de tournesol. Ceci est particulièrement vrai dans les conditions de l'Europe du sud, où le stress hydrique pendant l'été est le principal facteur limitant pour les grandes cultures. Cela pourrait compromettre la productivité de certaines cultures comme le tournesol qui ne peut pas autant compenser les pertes de levée que d'autres cultures comme le soja et le blé par ramification et tallage, respectivement. Enfin, étant donné que les dégâts de post-levée causés par les oiseaux sont le facteur limitant le plus important pour une bonne qualité d'implantation et la productivité de tournesol (Sausse et al. 2021; Sausse and Lévy 2021), il est nécessaire d'analyser si l'ampleur de ces dégâts dans la double culture sera différente de celle du système conventionnel. En plus du tournesol, le soja est un autre candidat potentiel pour la culture en dérobé, car en plus du pois, du colza ou de l'orge, cette culture peut être semée après la récolte du blé d'hiver ou de printemps.

Questions appliquées

- Quelles sont les variétés de tournesol et de soja les plus adaptées à la culture en dérobé ?
- Les causes de non-levée sont-elles différentes entre une culture conventionnelle et une culture en dérobé du tournesol et du soja ?
- La culture en dérobé du tournesol et du soja est-elle moins favorable aux dégâts de post-levée causés par les ravageurs vertébrés en raison de la présence d'une autre culture ?
- Comment assurer la qualité de l'implantation du tournesol et du soja en dérobé ?

Questions méthodologiques

- Comment déterminer un ensemble de critères (idéotypes) pour sélectionner des variétés de tournesol et de soja pour une culture en dérobé ?
- Est-il nécessaire de représenter les résidus de culture dans le modèle SIMPLE pour l'analyse des cultures en dérobé ? Si c'est le cas, quelles adaptations pourraient être envisagées ?
- Quels dispositifs mettre en place pour identifier les effets des cultures en dérobé sur les dynamiques de population de ravageurs vertébrés ? Comment mobiliser les connaissances, les concepts et les méthodes d'écologie du paysage pour répondre à cette question ?
- Comment développer un OAD pour améliorer la qualité d'implantation des cultures en dérobé ?

Maîtrise de l'implantation des Cultures Intermédiaires Multi-Services (CIMS)

Les CIMS ont le potentiel de fournir près d'une douzaine de SE, notamment l'amélioration de la productivité des cultures de rente suivantes, l'approvisionnement en azote, la réduction de l'oxyde nitreux, la rétention des nitrates, le stockage du carbone dans le sol, le contrôle de l'érosion, la colonisation des champignons mycorhiziens arbusculaires, la suppression des mauvaises herbes, la lutte contre les bioagresseurs, et la préservation des insectes utiles (Schipanski et al. 2014).

Malgré le potentiel des CIMS pour améliorer la durabilité agronomique et environnementale, la réussite de l'implantation de ces cultures reste un défi (Constantin et al., 2015). En outre, on ne sait que peu de choses sur les déterminants de la qualité de l'implantation de ces cultures, et sur les facteurs clés conduisant à des pertes de levée, et leur classement en termes d'importance (Constantin et al. 2015; Dorsainvil et al. 2005). Comme les CIMS ne procurent pas un avantage économique direct, les

agriculteurs ont tendance à minimiser les coûts de production en simplifiant les techniques de gestion de ces cultures. Par conséquent, une mauvaise qualité d'implantation des CIMS peut être due à des conditions non optimales du lit de semence, en termes de température, d'humidité et de structure du lit de semence (Håkansson et al. 2002; Constantin et al. 2015; Wendling et al. 2019). Outre la bonne réussite de l'implantation, aucune information quantitative n'est disponible dans la littérature sur la corrélation potentielle entre la qualité d'implantation et la production finale de biomasse (avant la destruction des CIMS). Ces informations sont essentielles pour le choix des espèces de CIMS à introduire dans différents systèmes de culture et dans des différentes situations de production. Par exemple, une CIMS ayant un faible taux de levée, en raison de mauvaises conditions de lit de semences, peut développer une quantité élevée de biomasse en raison de ses capacités de compensation de post-levée par ramification ou tallage. En revanche, une CIMS ayant un taux d'émergence élevé peut entraîner une faible biomasse finale en raison d'autres limitations en post-levée. Cela est d'autant plus vrai que les CIMS sont des cultures à faible apport d'intrants, qui sont le plus souvent cultivées sans irrigation ni apport d'engrais. Il est donc essentiel de mieux comprendre les déterminants de la qualité d'implantation et de production de biomasse des CIMS car les SE qu'elles fournissent en dépendent fortement.

Le choix des espèces et des mélanges

La mise en place d'une seule espèce de CIMS présente à la fois des avantages et des inconvénients (Chapagain et al. 2020). Les espèces de CIMS de la famille des *Poaceae* produisent d'excellentes quantités de biomasse aérienne, et elles semblent être économiques (notamment par un faible coût des semences et une grande disponibilité). Toutefois, elles présentent également certains inconvénients, par exemple, elles ne fixent pas l'azote ; la biomasse contient un rapport C/N plus élevé que les légumineuses ; elles peuvent produire une faible biomasse si elles sont cultivées sans apport d'azote supplémentaire ; elles peuvent priver la culture de rente suivante d'azote (Finney et al. 2017; Snapp et al. 2005; Chu et al. 2017). D'autre part, les espèces de CIMS de la famille des *Fabaceae* fixent l'azote atmosphérique et peuvent être cultivées sans engrais azotés supplémentaires. En outre, la plupart des CIMS de cette famille survivent pendant l'hiver et produisent une biomasse avec un rapport C/N plus faible que les Poacées (avec un rapport C/N plus faible) par rapport aux *Poaceae* qui ne fixent pas l'azote. Toutefois, l'inconvénient principal de certaines CIMS de la famille des *Fabaceae* est que leur qualité d'implantation est souvent insatisfaisante en raison d'une forte hétérogénéité de peuplement, d'une biomasse insuffisante et du coût plus élevé des semences par rapport à celui des *Poaceae* (Coombs et al. 2017; Chu et al. 2017; Wyngaarden et al. 2015). Ceci est particulièrement vrai si l'on tient compte d'un besoin accru en eau (d'une tolérance réduite au stress hydrique) de *Fabaceae* pour assurer une bonne qualité d'implantation, par rapport aux *Poaceae* ou aux *Brassicaceae* (Tribouillois et al. 2016). De même, la plupart des CIMS de la famille des *Brassicaceae* peuvent être d'excellents supprimeurs de bioagresseurs (Ait-Kaci Ahmed et al. 2020; Couëdel et al. 2019). De plus, elles permettent également de réduire le compactage du sol (Chen and Weil 2010) mais elles ne fixent pas l'azote atmosphérique.

L'analyse des caractéristiques des différentes familles botaniques, révèle qu'aucune espèce de plante ne peut à elle seule apporter tous les avantages recherchés dans une CIMS, et par conséquent, l'implantation d'associations d'espèces est indispensable pour exploiter les complémentarités des espèces pour obtenir la palette de SE des CIMS.

Analyse des effets de CIMS sur la qualité d'implantation de la culture de rente suivante

Plusieurs facteurs biotiques et abiotiques ont été signalés comme causes de non-levée et / ou dégâts de post-levée des cultures semées (**Tableau 7**). Parmi eux, les stress abiotiques les plus importants sont : le stress hydrique au sein du lit de semences (Constantin et al. 2015), un état structural grossier du lit de semences (Dürr and Aubertot 2000), un état structural trop fin du lit de semences qui favorise le compactage et / ou la formation d'une croûte de battance (Gallardo-Carrera et al. 2007). De même, les ravageurs (Firake et al. 2016; Khan et al. 2015; Kennedy and Connery 2008; Schillinger and Werner 2016) et les agents pathogènes transmis par le sol (Rojas et al. 2016; Foster et al. 2017; M P You et al. 2017) peuvent souvent attaquer les semences et les jeunes plantules en pré et post-émergence.

Les principaux SE fournis par les CIMS et liés à la phase d'implantation des cultures sont les suivants : amélioration de la structure du sol, amélioration de l'équilibre hydrique et donc de l'humidité du sol, et la réduction des populations d'agents pathogènes et de ravageurs telluriques (J. Acharya et al. 2019; Qi et al. 2020; Wen et al. 2017; Dawadi et al. 2019; K. Acharya et al. 2019; Regan et al. 2020). Tous ces services peuvent donc améliorer la qualité d'implantation des cultures de rente suivantes. De même, la présence de résidus de CIMS, partiellement ou complètement enfouis dans le lit de semences peut également entraîner certains DE, tels que des effets allélopathiques potentiels sur la germination des semences et l'émergence des plantules de la culture de rente suivante, un mauvais contact sol-semence de la culture de rente suivante, ou même une réduction de l'humidité du sol dans la couche supérieure concernée par la phase d'implantation. Tous ces aspects restent encore largement méconnus et il est important d'engager des travaux de recherche sur ces questions.

Tableau 7. Clé de diagnostic visuel décrivant les principales causes affectant l'implantation des cultures et description de leurs symptômes / caractéristiques (**ACL 1**)

Période	Variables observables			Causes de non-levée et / ou dégâts de post-levée
Semis - germination	Les semences ne germent pas (pré-germination)	Absence de semences ou présence de semences avec des parties altérées	Aucune semence ou partie de semence ne peut être retrouvée en raison d'une profondeur de semis trop superficielle	Problème technique de semis ou de prédation des graines par les oiseaux
			Tégument extérieur de la graine altéré, présence d'un tégument vide	Dégâts causés par les granivores (par exemple, limaces, vers de terre ou rongeurs)
			Contenu intacte des graines mais pas de germination	Stress abiotique (chaleur, hydrique ou mécanique) ou problème de dormance, ou mort des graines
Germination - levée	Les plantules n'émergent pas (pré-émergence)		Présence de graines pourries et absence de germination	Fontes de semis de pré-émergence (agents pathogènes transmis par les semences et le sol)
			Présence de trous ou de larves dans ou autour des semences	Ravageurs du sol (par exemple, les larves de mouches des semences, les taupins, les symphylls, les mille-pattes)
			Germination mais pas d'émergence, plantules tordues, croissance anormale des racines, absence de nécrose et/ou de pourriture, présence de croûte et/ou de compactage du sol dans le lit de semence	Stress mécaniques tels que le compactage du sol, la formation d'une croûte battance

			Germination mais pas d'émersion, plantules tordues, absence de nécrose et/ou de pourriture ou de croûte, présence de mottes au-dessus du semis dans le lit de semences	Stress mécaniques tels que ceux provoqués par les mottes de terre
			Germination mais pas d'émersion, plantules normales, absence de nécrose et/ou de pourriture ou de croûte, pas de mottes dans le lit de semences	Profondeur de semis trop élevée (problème technique de semis qui entraîne un mauvais contact sol-semence dans les systèmes sans labour)
			Germination mais pas d'émersion, plantules séchées ou desséchées, absence de nécrose et/ou de pourriture, pas de croûte de battance, ni compactage ou grosses mottes dans le lit de semence.	Stress hydrique de post-germination
Levée - compétition initiale entre les jeunes plantes	Les plantules ont bien levé (post-émersion)	La plantule s'affesse sur le sol à cause d'une tige endommagée	Flétrissement des plantules, nécroses rougeâtres des racines, pourriture de l'hypocotyle et du collet des plantules, absence ou peu de racines secondaires	Fontes de semis de post-émersion (agents pathogènes transmis par les semences et le sol)
			Trous et présence de larves dans les cotylédons, la tige et/ou les racines ; gonflement du collet des plantules ; rétrécissement et disparition progressive ou entortillement des plantules ; accumulation de débris bruns filamenteux	Ravageurs telluriques (par exemple, les mouches des semences, taupins, symphyllés)
		Dommage partiel ou total des feuilles, tige endommagée, plants déracinés	Cotylédons endommagés et/ou une partie de l'hypocotyle/épicotyle au moment de la levée des plantules ou juste après ; déracinement des plantules ou disparition complète de celles-ci ; piqûres et perforations ; perforation des feuilles ; retard de croissance et faible vigueur de la plantule ; feuilles mâchées ou plantules entières	Herbivorie liée aux ravageurs (e.g. altises, limaces, oiseaux, rongeurs, mammifères)
		La plantule s'affesse et meurt	Brûlure des feuilles, flétrissement soudain de toute la plante, taches brun pâle dans la parcelle	Dégâts dus au gel
		Les plantules ne tombent pas sur le lit de semences	Modification de la couleur des plantules, déformations, symptômes chlorotiques ou nécrotiques anormaux mais différents de ceux causés par les agents pathogènes telluriques	Stress chimique (phytotoxicité) ou asphyxie racinaire liée à un engorgement du sol

Questions appliquées

- Quelles sont les espèces de CIMS les plus performantes pour une large gamme de conditions environnementales en termes de qualité d'implantation et de production de biomasse ?
- Comment optimiser les modalités d'implantation des CIMS pour maximiser la qualité d'implantation et le niveau de biomasse produite dans une situation de production donnée ?
- Le taux d'émergence d'une CIMS en tant que culture unique diffère-t-il de celui des mélanges bi- ou tri-spécifiques ? Y a-t-il un effet allélopathique d'une espèce de CIMS vers une autre qui pourrait affecter la germination des semences et/ou la levée des plantules ?
- Les principales causes de non-levée diffèrent-elles entre les espèces de CIMS de différentes familles ? Sont-elles différentes en culture pure et en mélange ?
- Quelle est la relation entre le taux de levée et la production de biomasse des CIMS ?
- Quel est le meilleur stade végétatif et la meilleure modalité de destruction de CIMS pour maximiser leurs SE rendus pour la culture de rente suivante ? Les réponses sont-elles identiques pour les différentes espèces de CIMS ?
- Quel doit être le délai entre la destruction de CIMS et le semis de la culture suivante pour maximiser les SE ?

Questions méthodologiques

- Comment aider au choix des CIMS et de leur association pour optimiser la qualité d'implantation et la productivité des cultures de rente suivantes ?
- Comment caractériser les effets allélopathiques de certaines espèces sur le développement du peuplement des autres espèces associées au sein d'une CIMS en mélange ?
- Comment modéliser les effets allélopathiques de CIMS sur le développement de différents agents pathogènes ?
- Le modèle SIMPLE est-il adapté à l'étude des CIMS ? Si ce n'est pas le cas, quelles adaptations pourraient être envisagées ?
- Comment développer un indicateur synthétisant une analyse coût-bénéfice (SE-DE) des CIMS ?

Systèmes de culture sans traitement chimique des semences

L'utilisation de STPC est une pratique assez ancienne dont les premiers essais ont débuté au début du vingtième siècle, même si des traitements de semences de blé par des bains de saumure étaient utilisés dès le début du XVII^{ème} siècle pour limiter le développement du charbon (causé par *Ustilago tritici* ; (Hitaj et al. 2020). L'utilisation de STPC est devenue une pratique régulière pour de nombreuses grandes cultures aujourd'hui, et ce, dans le monde entier (Hitaj et al. 2020). Cette pratique consiste à traiter les semences avec plusieurs pesticides de synthèse, notamment des insecticides, des fongicides, des nématicides, des rodenticides ou des répulsifs pour oiseaux, seuls ou en association. L'objectif ultime du traitement des semences est de réduire les dégâts causés aux semences et aux plantules par les bioagresseurs. Ces derniers peuvent attaquer les semences dès la phase de germination, ainsi que les plantules en pré- et post-levée. Ces attaques peuvent aboutir à une mauvaise qualité d'implantation des cultures et à un développement réduit des peuplements avec des pertes économiques importantes pour les agriculteurs (Wrather et al. 2010; Simpson et al. 2011; Sappington et al. 2018).

Une récente étude américaine (Hitaj et al. 2020) a indiqué que l'utilisation de STPC a augmenté dans les principales grandes cultures au cours des dernières décennies, bien que les agriculteurs soient moins en capacité de savoir quels pesticides se trouvent sur leurs semences. Cela est principalement dû au fait que les semenciers ont de plus en plus souvent regroupé les caractéristiques des semences, y compris les multiples ingrédients actifs des pesticides, dans des emballages de semences standardisés et que les STPC sont le plus souvent commercialisés dans des emballages "génériques" (Hitaj et al. 2020) (**ACL 16**). Dans un tel cas, les agriculteurs n'ont guère le choix dans leur décision concernant l'utilisation (ou non) de STPC en fonction du risque de présence de ravageurs et d'agents pathogènes dans leurs champs. En conséquence, les agriculteurs doivent supporter un coût élevé d'achats de STPC sans aucune garantie sur la pertinence économique de ces achats. Aux États-Unis, outre la rentabilité économique, le manque d'information des agriculteurs sur les pesticides présents sur leurs semences a été signalé comme un obstacle majeur à leur capacité d'adapter l'utilisation des pesticides aux objectifs de production et environnementaux (Hitaj et al. 2020).

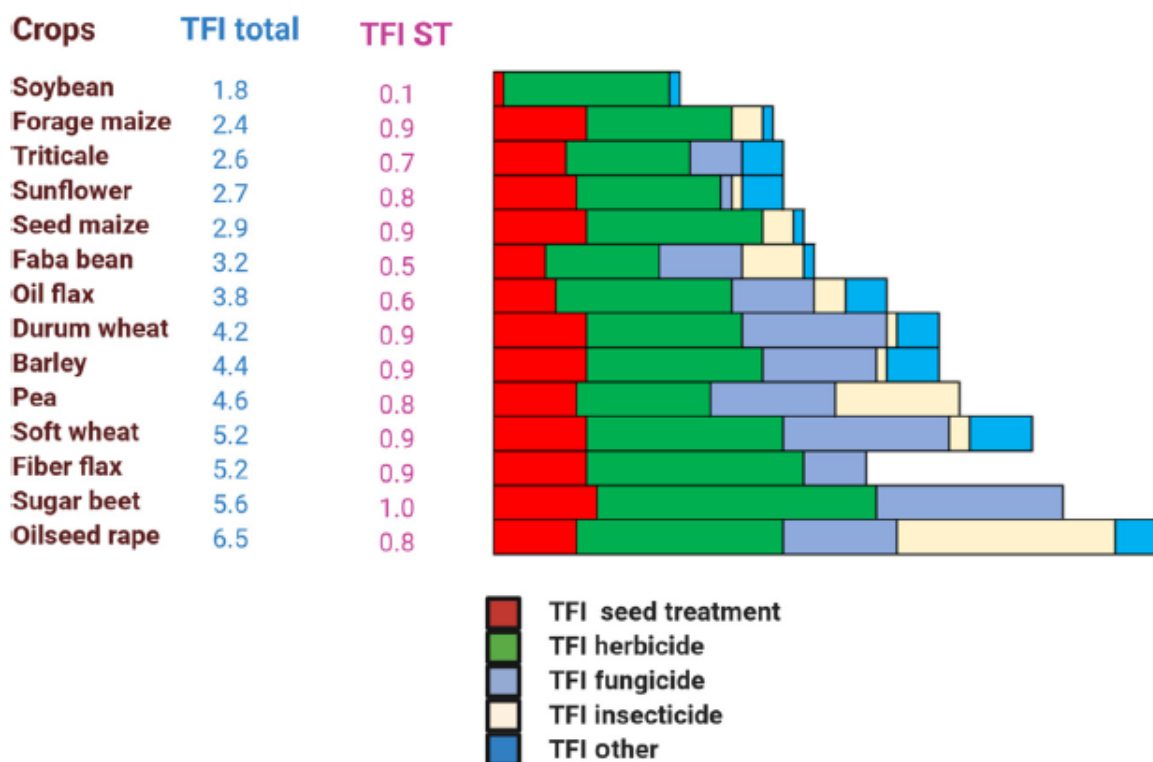


Figure 27. Indice de fréquence de traitement des principales grandes cultures en France. Le calcul est basé sur les résultats d'une enquête par questionnaire réalisée en 2017 auprès de 28 000 agriculteurs de grandes cultures. La contribution à l'IFT par le traitement des semences correspond à 1 lorsque les semences sont traitées. Un IFT < 1 signifie que soit l'agriculteur a planté des semences traitées uniquement dans certaines zones de son champ, soit il a mélangé les semences traitées avec les semences non traitées. Dans ces cas, le pourcentage de la superficie semée ou la quantité de semences traitées utilisées par rapport au total donnent la valeur réelle de l'IFT. Dans l'ensemble, l'IFT dû aux traitements des semences représente une part non négligeable des intrants chimiques pour la plupart de ces cultures et peut atteindre plusieurs centaines de milliers de tonnes de matières actives par saison de culture. ST : traitement de semences, TFI other : traitements effectués avec des pesticides autres que les fongicides, les insecticides et les herbicides ; par exemple, rodenticides ou répulsifs pour oiseaux (ACL 12).

La fréquence des pesticides chimiques appliqués par le biais du traitement des semences est plus faible (c'est-à-dire une seule fois par saison de culture) que celle des applications foliaires bien que la quantité totale de pesticides introduits dans l'environnement par cette pratique ne soit pas négligeable. Dans la plupart des pays de l'UE, l'utilisation des pesticides est généralement mesurée par l'IFT, qui est défini comme le nombre d'applications de pesticides par hectare et par année civile, en supposant l'utilisation d'une dose standard pour chaque utilisation autorisée de pesticides (Kudsk and Jensen 2014). En France, comme dans la plupart des pays de l'UE, le traitement des semences avec des pesticides n'était pas pris en compte dans le calcul de l'IFT jusqu'à très récemment. Les données montrent que l'IFT lié au traitement des semences représente une part importante des pesticides introduits dans l'environnement (**Figure 27**). Néanmoins, il y a un manque aigu d'informations sur les données relatives aux STPC, qui sont pour la plupart inaccessibles dans plusieurs régions du monde, y compris en Europe (**ACL 16 ; Figure 28**) et en Amérique du Nord (Hitaj et al. 2020).

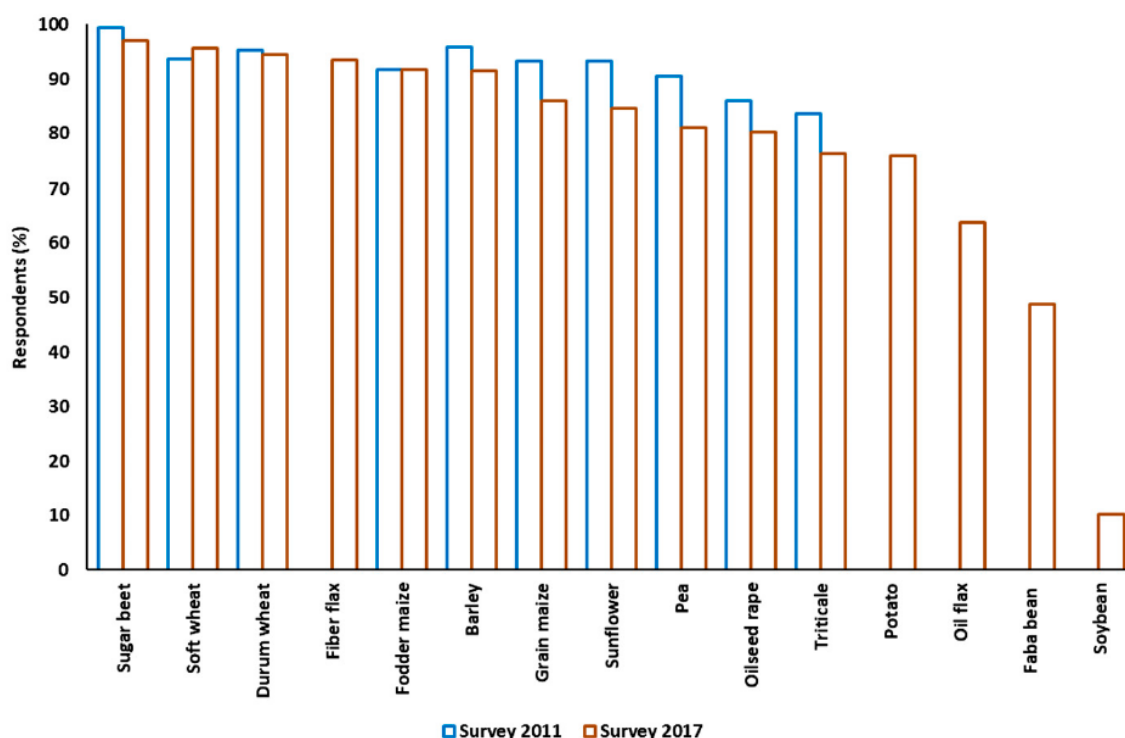


Figure 28. Pourcentage de grandes cultures semées avec des semences traitées en France, sur la base des résultats d'une enquête par questionnaire en 2011 et 2017. Les résultats sont issus de deux enquêtes conduites auprès de 25 000 et 28 000 agriculteurs en 2011 et 2017, respectivement. En 2017, les traitements de semences étaient très répandus et étaient les plus élevés pour la betterave sucrière, suivie de l'orge, du blé tendre, du lin textile, du maïs fourrager, de l'orge, du maïs grain, du tournesol, du pois, du colza, du triticale, de la pomme de terre, du lin oléagineux, de la féverole et du soja. L'enquête de 2011 n'a pas été menée pour le lin textile, la pomme de terre, le lin oléagineux, la féverole et le soja (Source : Agreste 2014 ; 2019).

Des études récentes ont montré que l'utilisation de STPC n'apporte pas nécessairement des avantages économiques aux agriculteurs, comme on le pensait auparavant (Mourtzinis et al. 2019; Rossman et al. 2018; Lundin et al. 2020). Cela est particulièrement vrai si l'on considère l'efficacité faible, nulle ou très variable des STPC dans la lutte contre les bioagresseurs (**ACL 15**) (Fadel Sartori et al. 2020; Lundin et al. 2020). En outre, plusieurs études ont démontré l'impact négatif de cette pratique sur la santé humaine, l'environnement en général et la biodiversité en particulier. Citons par exemple l'exposition au risque des opérateurs qui traitent les semences ou manipulent des semences traitées (White and Hoppin 2004; Han et al. 2021) ; le développement de différentes formes de cancer (AGRICAN 2020) ; les effets négatifs sur les organismes non ciblés tels que les abeilles (Rundlof et al. 2015; Main et al. 2020) ; les oiseaux (Li et al. 2020) et les micro-organismes bénéfiques du sol (Nettles et al. 2016; Zaller et al. 2016; Gomes et al. 2017) qui fournissent toute une série de SE. Une autre étude a également mis en évidence l'effet négatif de l'utilisation de STPC sur des champignons endophytes bénéfiques qui participent à la croissance et au développement des plantes, réduisant ainsi la croissance des jeunes plantules de plusieurs espèces de cultures (Vasanthakumari et al. 2018). Par conséquent, il est nécessaire de limiter ou de remplacer les STPC par d'autres pratiques durables pour atteindre le même objectif, tels que l'amélioration de la germination des semences, de la levée des plantules, de la production de biomasse, de la lutte contre les bioagresseurs, et l'amélioration du rendement des cultures, sans impact ou avec un impact moindre sur la santé humaine et l'environnement en utilisant le cadre de la PAEC (**ACL 12**).

Si plusieurs études récentes ont été menées sur les avantages par rapport aux risques des STPC dans différentes parties du monde, aucune étude de ce type n'a été réalisée à ce jour en France, ou même en Europe dans des conditions de production agricole. Il est donc nécessaire de mieux prendre en compte les risques biotiques associés aux bioagresseurs endocycliques qui dépendent des systèmes de culture et des conditions spécifiques du sol, tout en tenant compte de l'évolution de la réglementation sur les pesticides aux niveaux national et européen. Cela est d'autant plus vrai qu'aucune information n'est disponible dans la littérature sur la fréquence d'utilisation des STPC, les connaissances des agriculteurs sur les pesticides utilisés pour le traitement des semences, et leur perception des risques liés à la manipulation et à l'utilisation des STPC (**ACL 9** ; **Figure 29**). Les seuls rapports publiés par le ministère français de l'agriculture et de l'alimentation, basés sur des enquêtes auprès des agriculteurs sur les pratiques agricoles en 2011, 2014 et 2017 (Agreste 2019), fournissent des informations uniquement sur la part des terres agricoles implantées avec semences traitées pour 14 grandes cultures. En revanche, aucune information n'est disponible sur le type de pesticides utilisés pour le traitement des semences, le niveau de sensibilisation des agriculteurs à l'utilisation de STPC, les cibles potentielles de cette pratique, la prise de décision concernant le lieu et la manière dont ils utilisent les STPC, et les expositions aux risques dus à leur manipulation.



Figure 29. Nuage de mots mettant en évidence les mots clés qui devraient être mieux analysés par la recherche pour générer des connaissances primaires et combler le manque actuel de connaissances sur le sujet du traitement de semences par les pesticides (**ACL 9**).

Choix des espèces et des méthodes d'études

Bien que l'effet de certaines pratiques agricoles sur la performance des cultures puisse être constaté à court terme, de nombreuses autres pratiques ne peuvent apporter une réponse claire qu'à moyen ou long terme (Bai et al. 2018; Van Eerd et al. 2014; Miao et al. 2011). Cela peut être le cas notamment lors de la conversion de systèmes agricoles conventionnels vers des systèmes en agriculture biologique, ou de systèmes qui tendent à réduire les intrants chimiques (Deguine et al. 2016; Landi et al. 2018; Lupatini et al. 2017; Gomiero et al. 2011). En ce qui concerne plus spécifiquement l'utilisation des STPC, les avantages liés à cette pratique peuvent ne pas être observés au cours d'une saison de

culture. Cela est particulièrement vrai du fait que, dans les conditions de terrain, le résultat d'une pratique culturale donnée est également affecté par les conditions environnementales et les interactions avec les autres pratiques. Par conséquent, il ne suffit pas d'examiner si l'utilisation de STPC peut avoir un effet positif ou négatif pendant une saison de culture. En particulier, étant donné que l'utilisation de STPC a un effet négatif sur la biodiversité du sol, il peut falloir un certain temps pour restaurer la quantité et la diversité des organismes bénéfiques ou commensaux du sol en l'absence d'utilisation de STPC. Il est donc important d'envisager une rotation à long terme pour étudier les avantages par rapport aux risques de l'utilisation des STPC sur la qualité d'implantation et le rendement des cultures semées, ainsi que sur la biodiversité du sol. À cette fin, dans le cadre du projet Ecophyto DEPHY-EXPE FAST, plusieurs sites d'étude ont déjà été choisis dans le nord-est de la France, qui représentent un éventail de conditions pédologiques et climatiques ainsi qu'une diversité de SDC. Le blé d'hiver, l'orge d'hiver, le colza de printemps et le maïs seront les principales cultures considérées dans la rotation à long terme car elles sont le plus souvent traitées avec des pesticides chimiques.

Questions appliquées

- Dans quelle mesure l'utilisation de STPC améliore-t-elle la qualité d'implantation des cultures et leur rendement dans des systèmes de culture, des sols et des conditions environnementales contrastés ?
- Est-il possible de hiérarchiser les espèces cultivées vis-à-vis de l'intérêt de l'utilisation des STPC pour la qualité d'implantation et l'augmentation du rendement ?
- Quels sont les principaux leviers agronomiques qui peuvent être déployés comme alternatives à l'utilisation des STPC ?

Questions méthodologiques

- Comment caractériser l'impact de STPC sur la biodiversité du sol en fonction des conditions édaphiques et du SDC ?
- Comment caractériser l'impact de traitements chimiques sur le microbiote des semences et des plantules ?
- Les plantes mères sans traitement de semences produisent-elles des semences plus résistantes /tolérantes aux attaques de bioagresseurs (effet « *priming* ») ?

3. AXE II : PROTECTION AGROECOLOGIQUE DES CULTURES ET BIOCONTROLE PENDANT LA PHASE D'IMPLANTATION

Fonte de semis

La fonte de semis est une maladie qui entraîne une absence de germination des semences, le pourrissement des tubes germinatifs et des radicules, le flétrissement et le pourrissement du collet des jeunes plantules conduisant à la verse et à la mort de celles-ci (Agrios 2005). C'est une maladie qui touche toutes les cultures agricoles et représente pour les agriculteurs l'une des contraintes d'implantation et de rendement les plus importantes (Horst 2013). Plus d'une douzaine de champignons et d'oomycètes transmis par le sol sont la cause principale des fontes des semis, mais seuls quelques-uns d'entre eux sont fréquemment associés à la maladie. L'incidence de cette maladie peut varier de 5 à 80 %, ce qui entraîne de lourdes conséquences économiques pour les agriculteurs (**ACL 32**). Les pertes économiques causées par les fontes de semis sont constituées par un coût direct, dû aux dégâts subis par les semences ou les plantules (Rojas et al. 2016), et par un coût indirect, correspondant à un coût supplémentaire de re-semis et à des rendements plus faibles en raison de dates de semis plus tardives (Babadoost and Islam 2003; Bacharis et al. 2010; Horst 2013).

Comme pour d'autres maladies des plantes, les fongicides conventionnels sont largement utilisés pour gérer les fontes de semis (Hitaj et al. 2020) (**ACL 16**), avec trois conséquences majeures : i) effets négatifs sur la santé humaine comme par exemple l'exposition aux risques des opérateurs qui traitent les semences ou manipulent les semences traitées (White and Hoppin 2004; Han et al. 2021) avec un risque de développement de différentes formes de cancer (AGRICAN 2020) ; ii) les effets négatifs sur les organismes non cibles tels que les micro-organismes bénéfiques pour le sol (Nettles et al. 2016; Zaller et al. 2016; Gomes et al. 2017) ; et iii) l'émergence de micro-organismes résistants aux pesticides dans l'environnement (Dorrance et al. 2004; White et al. 2019). Ainsi, il est urgent de mettre au point des stratégies de gestion agroécologique des agroécosystèmes qui soient moins ou pas dépendantes des pesticides.

Pour répondre à ces questions, je prévois de développer un programme de recherche à l'interface de la PAEC et du biocontrôle en trois phases : i) criblage initial en laboratoire d'organismes ou produits potentiels de biocontrôle contre des agents pathogènes responsables de fontes de semis. Cela inclut des organismes vivants, y compris les micro-organismes et des glucosinolates produits par les brassicacées qui réduisent la croissance des agents pathogènes ; ii) tests avec les organismes les plus prometteurs en chambre de culture, en serre et au champ ; et iii) essai du potentiel de biofumigation de CIMS dans la gestion des fontes de semis dans des conditions de terrain.

Ravageurs

Une série de ravageurs invertébrés peuvent affecter la phase d'implantation des cultures, notamment les taupins (Furlan et al. 2010, 2020) et les larves de mouches (BSV 2016) mais parfois aussi les altises, les limaces, principalement dans les systèmes sans labour et en présence de résidus de culture à la surface du sol, comme le cas de l'agriculture de conservation (Mangan et al. 1995; Douglas and Tooker 2012; Griffin et al. 2015). Bien que certaines études aient été menées sur le potentiel de ces ravageurs à causer des pertes de récolte, ces études se sont principalement concentrées sur la phase

avancée du cycle de culture. Par conséquent, on sait peu de choses à ce jour sur les dégâts potentiels que ces ravageurs peuvent causer lors de la phase d'implantation des cultures, en particulier en l'absence de traitements chimiques des semences.

De même, les dégâts de post-émergence causés par les ravageurs vertébrés, en particulier les oiseaux, représentent un problème important pour les agricultures. Ces dégâts lors de la phase d'implantation sont devenus de plus en plus sévères pour toute une série de grandes cultures, notamment le maïs (Furlan et al. 2017), le tournesol (Sausse et al. 2021), le soja (Firake et al. 2016), et le colza (Schillinger and Werner 2016). En France, les dégâts d'oiseaux en post-levée est un sujet de préoccupation croissant sur le tournesol (Sausse and Lévy 2021). Pour cette raison, j'envisage également d'intégrer les dégâts en post-émergence causés par des ravageurs vertébrés dans mes activités de recherche car ces dégâts affectent la qualité d'implantation des grandes cultures. A cet égard, j'ai commencé à réaliser des observations et des mesures sur des parcelles de soja depuis 2018 pour quantifier les pertes de plantes en post-émergence. J'ai démontré que les taux finaux de dégâts de post-émergence dus au pigeon ramier varient de 22 à 32% alors que ceux dus au lièvre d'Europe varient de 17 à 18% dans l'espace et le temps, ce qui pourrait être dû à la mobilité des espèces et à la composition du paysage (**ACL 5**). Toutefois, l'impact sur le rendement de ces dégâts sera plus faible que celui pour le tournesol en raison de la capacité de compensation du soja par ramification à un stade plus avancé.

Suite à la sollicitation de différents collègues, j'ai lancé l'édition d'un numéro spécial intitulé "Impact assessment, ecology and management of animal pests affecting field crop establishment". Ce numéro spécial, édité par mes soins, a été publié dans la revue internationale Crop Protection (**ACL 1**). De nombreux chercheurs travaillant sur ce sujet au niveau national (e.g. Christophe Sausse ; Terres Inovia) et international (Lorenzo Furla, Veneto Agricoltura, Italie ; Lindsey Norgrove, université de Berne, Suisse ; ainsi que d'autres chercheurs des USA) ont contribué à ce numéro spécial. Ce numéro spécial servira de base pour une réflexion qui sera menée avec des collègues au niveau national pour un futur projet de collaboration sur le thème.

Récemment, j'ai proposé un cadre conceptuel de PAEC (**Figure 30**) pour mieux gérer les bioagresseurs affectant la qualité d'implantation des cultures (**ACL 12**). Ce cadre donne la priorité aux moyens non chimiques de protection des cultures bien que l'utilisation de STPC soient autorisées en dernier recours, sur la base d'une évaluation *a priori* des risques des zones d'implantation. Dans ce cadre, les « leviers de gestion des inocula » et les « traitements chimiques des semences » reçoivent respectivement la plus haute et la plus basse priorité. Mettre davantage l'accent sur la diversification des cultures et, en général, sur des mesures non chimiques améliorent la diversité microbienne du sol, qui joue un rôle important dans la santé des sols. De cette manière, une communauté microbienne bénéfique pour le sol plus développée peut aider à supprimer les ravageurs et les agents pathogènes telluriques, et à réduire leurs dégâts pendant la phase d'implantation. La gestion des inocula concerne à la fois les inocula présents dans le sol et ceux des semences. Elle est basée sur trois pratiques culturales clés : la diversification des cultures qui comprend la rotation des cultures, les cultures intercalaires et les cultures de couverture ; le travail du sol qui comprend le travail conventionnel, le travail minimum ou l'absence de travail du sol, selon les situations spécifiques ; l'utilisation de semences saines en testant la qualité sanitaire des semences avant leur utilisation ; le tri sélectif des semences non certifiées ; le test de la bonne capacité de germination des semences avant le semis, et l'application de méthodes biologiques de traitements des semences pour gérer les maladies transmises par les semences lorsque des semences non certifiées sont utilisées dans l'exploitation.

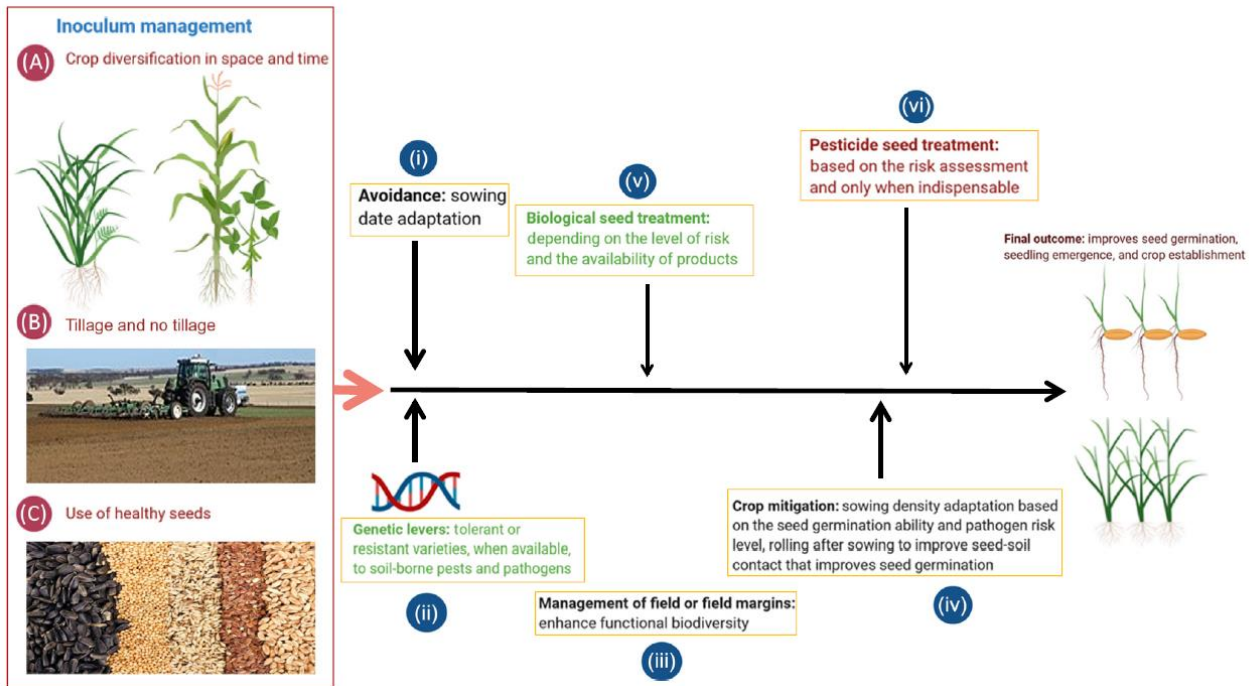


Figure 30. Un cadre de la protection intégrée des cultures qui combine tous les principaux leviers de gestion des cultures pour lutter contre des bioagresseurs affectant la qualité d'implantation des cultures semées (**ACL 12**). La flèche horizontale de gauche à droite représente un ensemble de leviers de la PAEC contre les maladies, alors que les flèches verticales représentent les différents leviers de la PAEC. L'ordre des chiffres Romains indique la priorité croissante accordée aux différents leviers de la PAEC.

Questions appliquées

- L'utilisation systématique de STPC ne permet pas de connaître la prévalence réelle des fontes de semis en parcelles agricoles. L'absence d'utilisation de STPC entrainerait-elle une augmentation de la prévalence de la maladie ? Les agroécosystèmes conduits de manière conventionnelle ou en agriculture biologique se comporteraient-il de manière identique à cet égard ?
- En absence de STPC, les systèmes agricoles innovants mobilisant des cultures en relais, ou des cultures associées, peuvent-ils mieux contenir les fontes de semis comparativement à des systèmes conventionnels ?
- En absence de STPC, les pratiques de biofumigation, basées principalement sur les cultures de couverture de Brassicaceae, peuvent-elles contenir les dégâts causés par des bioagresseurs telluriques pendant la phase d'implantation des cultures ?
- Quels sont les leviers agronomiques pour réduire les dégâts de post-levée causés par les oiseaux, au niveau de la parcelle et à un niveau supra-parcellaire ? En particulier, des dates de semis synchronisées pourraient-elles réduire ces dégâts ?
- Y a-t-il une corrélation entre la durée de la phase d'implantation de la culture et la sévérité des dégâts causés par les oiseaux (concept de phase critique) ?

Questions méthodologiques

- Comment mobiliser les connaissances disponibles en microbiologie des sols pour limiter les fontes de semis par des pratiques agroécologiques ? En particulier, la modélisation pourrait-elle être utile à cet égard ?
- Comment prendre en compte la variabilité du milieu au champ dans les tests en conditions contrôlées d'effets potentiels d'espèces candidates pour la biofumigation ?
- Comment développer un OAD pour la gestion des ravageurs vertébrés mobiles à l'échelle du paysage agricole ?

4. METHODES ET APPROCHES POUR REALISER MON PROJET DE RECHERCHE

Au cours des prochaines années, je travaillerai sur un ensemble de grandes cultures comme le soja, le tournesol et le maïs pop-corn ainsi que sur les CIMS. Ce choix est basé sur trois arguments : i) priorisation de projets en partenariat avec différents collègues de l'UMR AGIR sur ces cultures (ceci facilitera les interactions avec eux et me permettra de tirer profit de leurs expertises, de jeux de données déjà disponibles, et de continuer à contribuer à la dynamique de l'équipe) ; ii) pertinence de ces cultures par rapport à mes objectifs de recherche (e.g. étudier l'effet de traitements systématiques des semences de tournesol et de maïs pop-corn versus absence de traitement des semences de soja, absence de compensation des pertes avant et après levée du tournesol et du maïs pop-corn versus compensation du soja par ramification et croissance indéterminée ou semi-déterminée et l'effet global sur la qualité d'implantation et le rendement de ces cultures notamment) ; iii) potentiel de biofumigation de CIMS qui peuvent remplacer le traitement chimique des semences avec une durabilité économique et environnementale accrue.

Pour cette raison, j'ai structuré mes futures activités de recherche en quatre activités complémentaires :

- i) Diagnostics agronomiques locaux en parcelles agricoles pour observer les processus sous-jacents et caractériser les CNL. Ces diagnostics permettront d'analyser et de hiérarchiser les CNL dans des systèmes de culture et des situations de production contrastés. En même temps, ces résultats d'observation sur le terrain pourront permettre de formuler de nouvelles hypothèses de recherche.
- ii) Expérimentation au laboratoire et au champ. La première pour générer les données nécessaires à l'estimation des paramètres du modèle SIMPLE pour les cultures qui n'ont pas encore été paramétrées pour ce modèle (par exemple, cinétique de germination à différentes températures et différents potentiels hydriques, mortalité sous motte, croissance hétérotrophe). Expérimentations au champ qui auront deux objectifs principaux : a) tester des hypothèses de recherche spécifiques basées sur les résultats issus des diagnostics, et b) acquérir des données pour l'évaluation de la qualité de prédiction du modèle SIMPLE (par exemple, caractérisation du lit de semences, mesures de la profondeur de semis, cinétiques de germination et de levée, CNL).
- iii) Adaptation du modèle qualitatif CESIM, qui intègre à la fois les stress biotiques et abiotiques affectant la phase d'implantation, à d'autres grandes cultures et les CIMS. Cela est essentiel car les connaissances nécessaires pour le développement d'un modèle quantitatif sur les stress biotiques font encore défaut.
- iv) Développement d'un module quantitatif simple pour représenter l'apparition et les effets de stress biotiques (par exemple, via une représentation de la densité d'inoculum dans le sol ou la réceptivité du sol) sur la phase d'implantation et intégration de ce module au modèle SIMPLE. Une telle approche mécaniste de la modélisation sera complémentaire à l'approche qualitative utilisée avec le modèle CESIM. Ce travail pourra être effectué en utilisant la plateforme de modélisation Model Builder, développée par l'équipe (<https://modelbuilder.fr>).

5. ORGANISATIONS ET COLLABORATIONS POUR REALISER MON PROJET DE RECHERCHE

Suite à mon recrutement à l'INRA en septembre 2017, et pour répondre à mes objectifs de recherche, j'ai décidé de reconsidérer profondément mon réseau de collaboration antérieur qui a été principalement construit à partir de mes thématiques de recherche précédentes. Ce faisant, j'ai dû arrêter de collaborer avec des collègues dont le sujet de recherche était éloigné de mon sujet actuel. J'ai maintenu la collaboration avec ceux dont le sujet de recherche et l'expertise sont d'une manière ou d'une autre liés à mon sujet de recherche actuel. De plus, j'ai mis en place de nouvelles interactions avec des collègues travaillant sur un sujet de recherche similaire au mien (**Figure 31**).

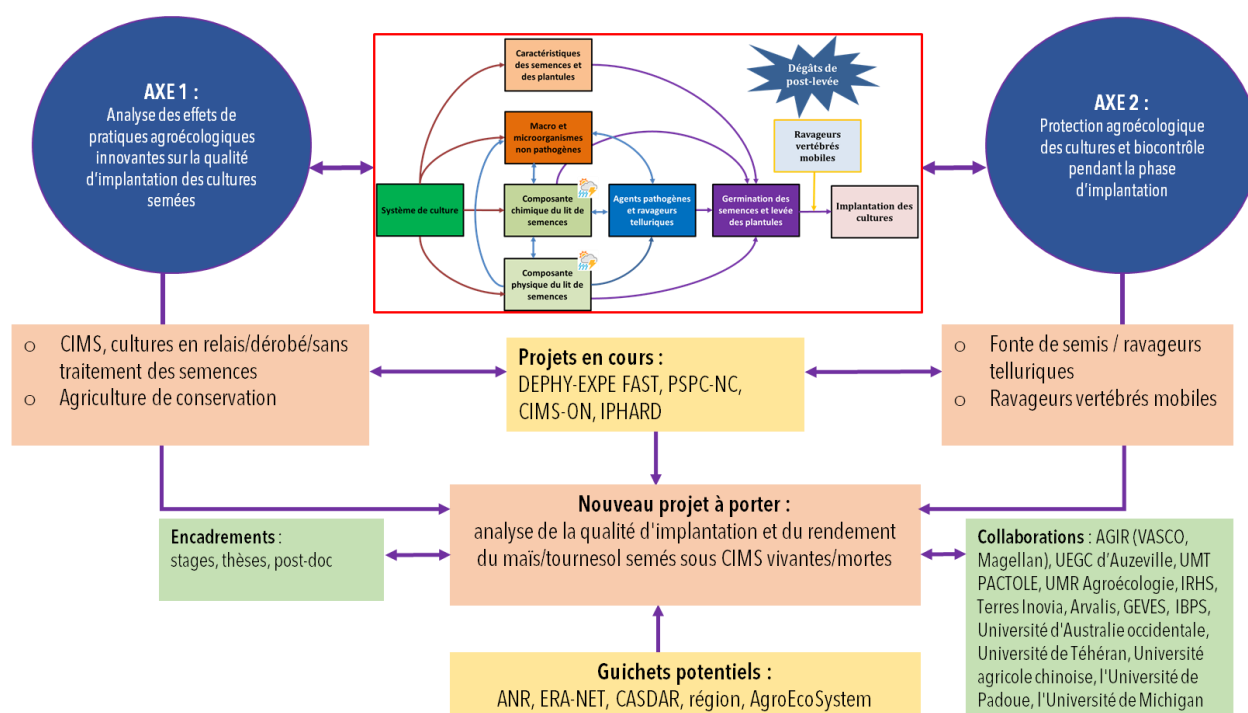


Figure 31. Organisation thématique et opérationnelle de mon projet de recherche. Dans le cadre rouge : schéma conceptuel des principaux déterminants de la phase d'implantation. En bleu foncé : les deux axes structurant de mon projet. En saumon : thématiques abordées. En jaune : projets de recherche financés et guichets identifiés pour de futurs projets. En vert : encadrements et collaborations nécessaires pour réaliser mes projets de recherche.

Globalement, j'ai structuré trois niveaux de collaboration, en relation avec les projets auxquels je participe actuellement, et ceux que je compte développer à l'avenir.

Au niveau local au sein d'AGIR :

Je vais continuer à collaborer avec Jean-Noël Aubertot (équipe VASCO) qui dispose notamment d'une expertise forte sur le modèle SIMPLE. Je vais continuer à collaborer avec lui de manière à valoriser les travaux méthodologiques qu'il développe avec différents collègues. Cela a été le cas avec l'approche de modélisation qualitative IPSIM que j'ai adaptée à ma problématique (modèle CESIM). De la même

manière, la plateforme Model Builder devrait me permettre de développer mes propres modèles épidémiologiques, voire de ré-implémenter SIMPLE de manière à bénéficier des fonctionnalités de la plateforme, notamment en ce qui concerne la multi-simulation. De cette manière, je disposerai, à moyen terme, d'une palette de méthodes de modélisation complémentaires me permettant d'aborder différentes thématiques liées à la gestion de l'implantation des cultures.

J'interagis de plus en plus avec Lionel Alletto (équipe VASCO) qui dispose d'une forte expertise sur les CIMS, ainsi qu'en science du sol. Comme je compte m'investir de plus en plus sur l'étude de ces cultures par une approche de multi-simulations avec le modèle SIMPLE, cette interaction est d'une importance fondamentale pour générer les données nécessaires.

Je prévois maintenir mes interactions avec Pierre Maury et Philippe Debake (équipe VASCO) pour les travaux à l'interface avec l'écophysiologie des cultures oléo-protéagineuses. Cette collaboration est importante pour moi, notamment pour évaluer les différences inter- et intra-spécifiques des semences de ces cultures (réponse à une gamme de températures et de potentiels hydriques), informations nécessaires à l'utilisation du modèle SIMPLE.

Pour les travaux de recherche liés aux multi-simulations sous des scénarios climatiques futurs, j'ai l'intention de continuer d'interagir avec Julie Constantin (équipe Magellan) car ce travail nécessite une expertise du modèle STICS pour générer des données microclimatiques du lit de semences. Pour les aspects plus techniques en informatique, je compte renforcer ma collaboration avec Hélène Raynal (équipe Magellan) et David Camilo Corrales (TWB), notamment pour l'interfaçage de SIMPLE avec R, dans le but d'automatiser les travaux de simulation.

De même, pour les aspects biotiques, je poursuivrai mon interaction avec Marie-Hélène Robin (enseignante-chercheuse de l'EI Purpan, associée à l'UMR AGIR) qui a une expertise en Phytopathologie, avec Célia Seassau (enseignante-chercheuse de l'EI Purpan, associée à l'UMR AGIR) qui travaille sur le potentiel de biofumigation des CIMS, et avec Jean-Pierre Sarthou (Professeur de l'ENSAT, associé à l'UMR AGIR) qui a une forte expertise des ravageurs telluriques. Toutes ces collaborations me permettront de renforcer mes travaux sur la prise en compte des aspects biotiques dans mes recherches, en particulier pour mieux analyser l'impact des pathogènes et des ravageurs telluriques sur la qualité d'implantation des grandes cultures.

Au niveau national

Mon objectif à moyen terme est d'analyser comment certaines pratiques culturelles telles que le traitement chimique des semences, l'utilisation de CIMS, et la biofumigation affectent les organismes bénéfiques du sol et des plantes, y compris le microbiote du sol et des plantules, et comment tout cela affecte la qualité de l'implantation des grandes cultures. Cet aspect est également important pour renforcer mes travaux sur la composante biotique, et en particulier pour développer des stratégies de biocontrôle des bioagresseurs responsables de fontes de semis. Pour développer cette recherche, j'ai l'intention de renforcer mes interactions avec Matthieu Barret et Muriel Marchi (sur le micro- et pathobiome des semences ; IRHS, Angers) et Christian Steinberg (écologie microbienne du sol ; UMR Agroécologie, Dijon). Des discussions sont en cours pour développer de futures collaborations y compris un co-encadrement de thèse (cf. projet MILPA parmi les projets déposés mais non aboutis). J'ai également l'intention de renforcer ma collaboration avec Christophe Sausse, Terre Inovia) qui a une forte expertise sur les dégâts d'oiseaux pendant la phase d'implantation.

Au niveau international

Grâce à mon expérience internationale et à mon réseau de recherche, je me sens très à l'aise pour interagir avec des collègues internationaux. Dans le but de renforcer mon réseau international, j'ai commencé à interagir avec de nouveaux collègues, principalement en dehors de l'Europe, qui travaillent sur des sujets similaires aux miens. Ces collaborations impliquent notamment des échanges de bases de données, des accueils de courte durée, des co-encadrements de thèses, avec l'objectif de valoriser collectivement les résultats de nos recherches. Plus précisément, j'échange régulièrement avec Martin Barbetti (l'Université d'Australie occidentale), que nous avons invité dans l'UMR pour un mois en 2019 dans le cadre du programme d'accueil de professeurs visiteurs financé par l'INPT. Cette collaboration a été très fructueuse et a déjà donné lieu à la co-publication de cinq articles, dont celui du modèle CESIM.

J'interagis aussi avec Martin Chilvers (l'Université de Michigan, USA) qui possède une base de données fournie sur les stress biotiques affectant la phase d'implantation du soja. A moyen terme, cette base de données a vocation à contribuer au développement d'un module sur les stress biotiques, à intégrer dans le modèle SIMPLE.

Je collabore également avec Elias Soltani (l'Université de Téhéran, en Iran), sur des travaux sur caractéristiques des semences et des plantules affectant la qualité d'implantation sous l'effet des pratiques culturales telles que les traitements des semences. Plusieurs travaux de méta-analyse sont en cours sur ce sujet et devraient alimenter mes futurs travaux de recherche.

Enfin, je suis en interaction active avec Wenfeng Cong (CAU) sur l'analyse du fonctionnement des CIMS. Cette collaboration devrait se poursuivre via le co-encadrement d'une thèse après mon HDR. Je travaille depuis deux ans avec des collègues au niveau local et national sur la qualité d'implantation et la production de biomasse des CIMS, et leurs effets abiotiques et biotiques potentiels sur les cultures de vente suivantes. Les expériences menées ces deux dernières années en laboratoire et sur le terrain ont généré de nombreuses données qui peuvent être utilisées pour paramétrer le modèle SIMPLE et tester sa qualité de prédiction. En effet, nous avons constaté que les facteurs clés affectant la qualité d'implantation des CIMS sont de nature abiotique (contraintes mécaniques telles que les croûtes de battance, les mottes de terre et la compaction du sol, ainsi que le stress hydrique). Par conséquent, l'utilisation du modèle SIMPLE semble très adaptée pour étudier la qualité d'implantation des CIMS par couplage avec le modèle STICS. En particulier, je souhaiterais réaliser une étude par multi-simulation en considérant une large gamme de conditions pédo-climatiques prenant en compte le climat passé (référence) et différents scénarios climatiques futurs. J'envisage de co-encadrer une thèse sur ce sujet dans le cadre de la collaboration A-AGD entre INRAE et CAU. Afin de mener à bien ce projet, je collaborerai avec des collègues ayant une expertise sur les CIMS aux niveaux local, national et international. Au niveau local, je collaborerai avec Lionel Alletto (équipe VASCO) qui a une forte expertise sur le plan agronomiques des CIMS, et en science du sol, Julie Costantin (équipe Magellan), qui a une expertise sur STICS et les CIMS, Gregory Vericel (Arvalis) qui dispose également d'une forte expertise agronomique sur les CIMS et qui a co-développé la méthode MERCI (Minette 2020). Je compte également solliciter les collègues de l'unité de service AgroClim d'Avignon car ils peuvent me faire bénéficier de leur expertise sur les modèles et les données climatiques. Afin de réaliser des travaux de multi-simulations avec SIMPLE, il est nécessaire d'automatiser la procédure à l'aide du langage R. Pour cette partie, je collaborerai avec Jean-Noël Aubertot (équipe VASCO), Hélène Raynal

(équipe Magellan) et David Camilo Corrales (TWB) ayant une forte expertise en informatique et en méthodologie de la modélisation.

L'objectif global pour moi est de donner une continuité à mes activités de recherche en m'investissant dans des projets de recherche collectifs pertinents avec la trajectoire de l'UMR AGIR, et d'augmenter la visibilité de mes recherches au niveau national et international. Concernant ce dernier point, je pense qu'il est également important de conforter la visibilité du collectif AGIR, et de INRAE en général. Dans ce but, je me suis également investi dans des activités éditoriales. Depuis deux ans, je suis co-rédacteur en chef de la revue internationale Crop Protection. Cette partie de mon travail me permet de réaliser une veille bibliographique sur ma thématique de recherche, et d'une manière plus générale, sur les méthodes et les outils développés dans le domaine de la protection des cultures.

CHAPITRE IV. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Acharya, J., Moorman, T. B., Kaspar, T. C., Lenssen, A. W., and Robertson, A. E. 2019. Cover Crop Rotation Effects on Growth and Development, Seedling Disease, and Yield of Corn and Soybean. *Plant Dis.* 104:677–687 Available at: <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-19-1904-RE>.
- Acharya, K., Yan, G., and Berti, M. 2019. Can winter camelina, crambe, and brown mustard reduce soybean cyst nematode populations? *Ind. Crops Prod.* 140:111637 Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669019306478>.
- AGRICAN. 2020. Enquête agriculture & cancer. In , p. 60.
- Agrios, G. N. 2005. *Plant pathology*. Academic Press, New York, N.Y.
- Ait-Kaci Ahmed, N., Dechamp-Guillaume, G., and Seassau, C. 2020. Biofumigation to protect oilseed crops: focus on management of soilborne fungi of sunflower☆. *OCL.* 27 Available at: <https://doi.org/10.1051/ocl/2020052>.
- Akanvou, R., Kropff, M. J., Bastiaans, L., and Becker, M. 2002. Evaluating the use of two contrasting legume species as relay intercrop in upland rice cropping systems. *F. Crop. Res.* 74:23–36 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429001001988>.
- Aktar, M. W., Sengupta, D., and Chowdhury, A. 2009. Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdiscip Toxicol.* 2:1–12.
- Aubertot, J. N., Finckh, M. R., Pinel, B., and van der Werf, W. 2021. Contribution of intercropping to pesticide use reduction. https://www.remix-intercrops.eu/content/download/4188/39695/version/1/file/ReMIX_Policy%20Brief%203.pdf.
- Babadoost, M., and Islam, S. Z. 2003. Fungicide Seed Treatment Effects on Seedling Damping-off of Pumpkin Caused by *Phytophthora capsici*. *Plant Dis.* 87:63–68 Available at: <http://dx.doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.1.63>.
- Bacharis, C., Gouziotis, A., Kalogeropoulou, P., Koutita, O., Tzavella-Klonari, K., and Karaoglanidis, G. S. 2010. Characterization of *Rhizoctonia* spp. Isolates Associated with Damping-Off Disease in Cotton and Tobacco Seedlings in Greece. *Plant Dis.* 94:1314–1322 Available at: <http://dx.doi.org/10.1094/PDIS-12-09-0847>.
- Bai, Z., Caspari, T., Gonzalez, M. R., Batjes, N. H., Mäder, P., Bünemann, E. K., et al. 2018. Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 265:1–7 Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016788091830224X>.
- Baltrus, D. A., Nishimura, M. T., Romanchuk, A., Chang, J. H., Mukhtar, M. S., Cherkis, K., et al. 2011. Dynamic Evolution of Pathogenicity Revealed by Sequencing and Comparative Genomics of 19 *Pseudomonas syringae* Isolates ed. David S Guttman. *PLoS Pathog.* 7:22 Available at: <http://dx.plos.org/10.1371/journal.ppat.1002132>.
- Bandyopadhyay, P. K., Singh, K. C., Mondal, K., Nath, R., Ghosh, P. K., Kumar, N., et al. 2016. Effects of stubble length of rice in mitigating soil moisture stress and on yield of lentil (*Lens culinaris* Medik) in rice-lentil relay crop. *Agric. Water Manag.* 173:91–102 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377416301718>.
- Barthes, B., Azontonde, A., Blanchart, E., Girardin, C., and Villenave, C. et al. . 2006. Effect of a legume

cover crop on carbon storage and erosion in an ultisol under maize cultivation in southern Benin. In *Soil erosion and carbon dynamics*, RC Press LLC; Boca Raton; USA, p. 143–155.

Bertheau, Y., and Davison, J. 2011. *Soybean in the European Union, Status and Perspective, Recent Trends for Enhancing the Diversity and Quality of Soybean Products*. ed. D Krezhova.

Blunk, S., Bussell, J., Sparkes, D., de Heer, M. I., Mooney, S. J., and Sturrock, C. J. 2021. The effects of tillage on seed-soil contact and seedling establishment. *Soil Tillage Res.* 206:104757 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198720305390>.

Bourguet, D., and Guillemaud, T. 2016. The Hidden and External Costs of Pesticide Use. In *Sustainable Agriculture Reviews: Volume 19*, ed. Eric Lichtfouse. Cham: Springer International Publishing, p. 35–120. Available at: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_2.

Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M. H., Ruget, F., Nicoullaud, B., et al. 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*.

BSV. 2016. *Résultats de l'enquête dégâts de mouche (géomyze) sur maïs en Bretagne. Bulletin de Santé végétal (in French)*.

Canteros, B. I., Rybak, M., Gochez, A., Velazquez, P., Rivadeneira, M., Mitidieri, M., et al. 2008. Occurrence of copper resistance in *Xanthomonas axonopodis* pv. *citri* in Argentina. *Phytopathology*. 98:S30.

Cassman, K. G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 96:5952–5959.

Cazorla, F. M., Arrebola, E., Sesma, A., Pérez-García, A., Codina, J. C., Murillo, J., et al. 2002. Copper resistance in *Pseudomonas syringae* strains isolated from mango is encoded mainly by plasmids. *Phytopathology*. 92:909–916.

Chapagain, T., Lee, E. A., and Raizada, M. N. 2020. The Potential of Multi-Species Mixtures to Diversify Cover Crop Benefits. *Sustainability*. 12 Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/5/2058>.

Chataway, R. G., Cooper, J. E., Orr, W. N., and Cowan, R. T. 2011. The role of tillage, fertiliser and forage species in sustaining dairying based on crops in southern Queensland 2. Double-crop and summer sole-crop systems. *Anim. Prod. Sci.* 51:904–919 Available at: <https://doi.org/10.1071/AN11032>.

Chauhan, B. S., and Johnson, D. E. 2011. Row spacing and weed control timing affect yield of aerobic rice. *F. Crop. Res.* 121:226–231 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429010003229>.

Chen, G., and Weil, R. R. 2010. Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant Soil*. 331:31–43 Available at: <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0223-7>.

Chu, M., Jagadamma, S., Walker, F. R., Eash, N. S., Buschermohle, M. J., and Duncan, L. A. 2017. Effect of multispecies cover crop mixture on soil properties and crop yield. *Agric. Environ. Lett.* 2:170030.

Constantin, J., Dürr, C., Tribouillois, H., and Justes, E. 2015. Catch crop emergence success depends on weather and soil seedbed conditions in interaction with sowing date: A simulation study using the SIMPLE emergence model. *F. Crop. Res.* 176:22–33 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429015000593>.

Coombs, C., Lauzon, J. D., Deen, B., and Van Eerd, L. L. 2017. Legume cover crop management on nitrogen dynamics and yield in grain corn systems. *F. Crop. Res.* 201:75–85 Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429016306074>.

Cooper, J., and Dobson, H. 2007. The benefits of pesticides to mankind and the environment. *Crop Prot.* 26:1337–1348.

Couëdel, A., Kirkegaard, J., Alletto, L., and Justes, É. 2019. Chapter Two - Crucifer-legume cover crop mixtures for biocontrol: Toward a new multi-service paradigm. In *Advances in Agronomy*, ed. Donald L Sparks. Academic Press, p. 55–139. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211319300562>.

Dawadi, S., Baysal-Gurel, F., Adesso, K. M., Oliver, J. B., and Simmons, T. 2019. Impact of Cover Crop Usage on Soilborne Diseases in Field Nursery Production. *Agronomy*. 9 Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4395/9/11/753>.

Debaeke, P., Casadebaig, P., Flenet, F., and Langlade, N. 2017. Sunflower crop and climate change: vulnerability, adaptation, and mitigation potential from case-studies in Europe. *OCL*. 24 Available at: <https://doi.org/10.1051/ocl/2016052>.

Deguine, J.-P., Gloanec, C., Laurent, P., Ratnadass, A., and Aubertot, J.-N. (Editors). 2016. *Protection agroécologique des cultures*. Versailles: Quae.

Dimitri, G., Yuri, V., Albores-Barajas, N., Emilio, B., Lorenzo, V., and Cecilia, S. 2012. Feral Pigeons: Problems, Dynamics and Control Methods, Integrated Pest Management and Pest Control Current and Future Tactics Dr. Sonia Soloneski(Ed.), ISBN: 978-953-51-0050-8, InTech,.

Dorrance, A. E., Berry, S. A., Bowen, P., and Lipps, P. E. 2004. Characterization of *Pythium* spp. from Three Ohio Fields for Pathogenicity on Corn and Soybean and Metalaxyl Sensitivity. *Plant Heal. Prog.*

Dorsainvil, F., Durr, C., Justes, E., and Carrera, A. 2005. Characterisation and modelling of white mustard (*Sinapis alba* L.) emergence under several sowing conditions. *Eur. J. Agron.* 23:146–158.

Douglas, M. R., and Tooker, J. F. 2012. Slug (Mollusca: Agriolimacidae, Arionidae) Ecology and Management in No-Till Field Crops, With an Emphasis on the mid-Atlantic Region. *J. Integr. Pest Manag.* 3:C1–C9 Available at: <https://doi.org/10.1603/IPM11023>.

Dürr, C., and Aubertot, J.-N. 2000. Emergence of seedlings of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) as affected by the size, roughness and position of aggregates in the seedbed. *Plant Soil*. 219:211–220 Available at: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004723901989>.

Dürr, C., Aubertot, J. N., Richard, G., Dubrulle, P., Duval, Y., and Boiffin, J. 2001. SIMPLE: a model for SIMulation of PLant Emergence predicting the effects of soil tillage and sowing operations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:414–442.

Dürr, C., Constantin, J., Wagner, M.-H., Navier, H., Demilly, D., Goertz, S., et al. 2016. Virtual modeling based on deep phenotyping provides complementary data to field experiments to predict plant emergence in oilseed rape genotypes. *Eur. J. Agron.* 79:90–99 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030116301149>.

Duru, M., Therond, O., and Fares, M. 2015. Designing agroecological transitions; A review. *Agron. Sustain. Dev.* 35:1237–1257 Available at: <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0318-x>.

Echarte, L., Maggiora, A. Della, Cerrudo, D., Gonzalez, V. H., Abbate, P., Cerrudo, A., et al. 2011. Yield

response to plant density of maize and sunflower intercropped with soybean. *F. Crop. Res.* 121:423–429 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429011000372>.

Van Eerd, L. L., Congreves, K. A., Hayes, A., Verhallen, A., and Hooker, D. C. 2014. Long-term tillage and crop rotation effects on soil quality, organic carbon, and total nitrogen. *Can. J. Soil Sci.* 94:303–315.

Elena, S. F., Bedhomme, S., Carrasco, P., Cuevas, J. M., de la Iglesia, F., Lafforgue, G., et al. 2011. The Evolutionary Genetics of Emerging Plant RNA Viruses. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 24:287–293 Available at: <https://doi.org/10.1094/MPMI-09-10-0214>.

European Commission. 2009a. Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides.

European Commission. 2009b. Regulation (EC) No 1107/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 concerning the placing of plant protection products on the market and repealing Council Directives 79/117/EEC and 91/414/EEC.

Fabi, A., and Varvaro, L. 2006. Spatial and temporal distribution of dieback of hazelnut on Cimini hills (Central Italy) by use of Geographic Information System and Geostatistics. In *Proc. 12th Congr. Medit. Phytopath.*, Rhodes Island, Greece, p. 217–219.

Fadel Sartori, F., Floriano Pimpinato, R., Tornisiello, V. L., Dieminger Engroff, T., de Souza Jaccoud-Filho, D., Menten, J. O., et al. 2020. Soybean seed treatment: how do fungicides translocate in plants? *Pest Manag. Sci.* Available at: <https://doi.org/10.1002/ps.5771>.

Finney, D. M., Murrell, E. G., White, C. M., Baraibar, B., Barbercheck, M. E., and Al., E. 2017. Ecosystem services and disservices are bundled in simple and diverse cover cropping systems. *Agric. Environ. Lett.* 2:170033.

Firake, D. M., Behere, G. T., and Chandra, S. 2016. An environmentally benign and cost-effective technique for reducing bird damage to sprouting soybean seeds. *F. Crop. Res.* 188:74–81 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429016300089>.

Foster, K., You, M. P., Nietschke, B., Edwards, N., and Barbetti, M. J. 2017. Widespread decline of subterranean clover pastures across diverse climatic zones is driven by soilborne root disease pathogen complexes. *Crop Pasture Sci.* 68:33–44.

Furlan, L., Benvegnù, I., Chiarini, F., Loddo, D., and Morari, F. 2020. Meadow-ploughing timing as an integrated pest management tactic to prevent soil-pest damage to maize. *Eur. J. Agron.* 112:125950 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030119300875>.

Furlan, L., Bonetto, C., Finotto, A., Lazzeri, L., Malaguti, L., Patalano, G., et al. 2010. The efficacy of biofumigant meals and plants to control wireworm populations. *Ind. Crops Prod.* 31:245–254 Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669009002003>.

Furlan, L., Milosavljević, I., Chiarini, F., and Benvegnù, I. 2021. Effects of conventional versus no-tillage systems on the population dynamics of elaterid pests and the associated damage at establishment of maize crops. *Crop Prot.* :105751 Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219421002210>.

Furlan, L., Vasileiadis, V. P., Chiarini, F., Huiting, H., Leskovšek, R., Razinger, J., et al. 2017. Risk assessment of soil-pest damage to grain maize in Europe within the framework of Integrated Pest Management. *Crop Prot.* 97:52–59 Available at:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219416303520>.

Gallardo-Carrera, A., Léonard, J., Duval, Y., and Dürr, C. 2007. Effects of seedbed structure and water content at sowing on the development of soil surface crusting under rainfall. *Soil Tillage Res.* 95:207–217 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198707000244>.

Geiger, F., Bengtsson, J., Berendse, F., Weisser, W. W., Emmerson, M., Morales, M. B., et al. 2010. Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. *Basic Appl. Ecol.* 11:97–105.

Gomes, Y. C. B., Dalchiavon, F. C., and de Assis Valadão, F. C. 2017. Joint use of fungicides, insecticides and inoculants in the treatment of soybean seeds. *Rev. Ceres, Viçosa.* 64:258–265.

Gomiero, T., Pimentel, D., and Paoletti, M. G. 2011. Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional vs. Organic Agriculture. *CRC. Crit. Rev. Plant Sci.* 30:95–124 Available at: <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.554355>.

Graß, R., Thies, B., Kersebaum, K.-C., and Wachendorf, M. 2015. Simulating dry matter yield of two cropping systems with the simulation model HERMES to evaluate impact of future climate change. *Eur. J. Agron.* 70:1–10 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030115000751>.

Griffin, M., Hogan, B., and Schmidt, O. 2015. Silicon reduces slug feeding on wheat seedlings. *J. Pest Sci.* (2004). 88:17–24 Available at: <https://doi.org/10.1007/s10340-014-0579-1>.

Guichard, L., Dedieu, F., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., Reau, R., and Savini, I. 2017. Le plan Ecophyto de réduction d'usage des pesticides en France : décryptage d'un échec et raisons d'espérer. *Cah. Agric.* 26:14002.

Håkansson, I., Myrbeck, Å., and Etana, A. 2002. A review of research on seedbed preparation for small grains in Sweden. *Soil Tillage Res.*

Han, R., Wu, Z., Huang, Z., Man, X., Teng, L., Wang, T., et al. 2021. Tracking Pesticide Exposure to Operating Workers for Risk Assessment in Seed Coating with Tebuconazole and Carbofuran. *Pest Manag. Sci.* n/a Available at: <https://doi.org/10.1002/ps.6315>.

Heaton, E. A., Schulte, L. A., Berti, M., Langeveld, H., Zegada-Lizarazu, W., Parrish, D., et al. 2013. Managing a second-generation crop portfolio through sustainable intensification: Examples from the USA and the EU. *Biofuels, Bioprod. Biorefining.* 7:702–714 Available at: <https://doi.org/10.1002/bbb.1429>.

van Herk, W. G., and Vernon, R. S. 2013. Wireworm damage to wheat seedlings: effect of temperature and wireworm state. *J. Pest Sci.* (2004). 86:63–75 Available at: <https://doi.org/10.1007/s10340-012-0461-y>.

Hexen, R. W., and Boxley, R. F. 1986. *Trends in double cropping. Natural resource economics division, economic research service, U.S. Department of Agriculture. Agric. Econ. Rep.*

Hillocks, R. J. 2012. Farming with fewer pesticides: EU pesticide review and resulting challenges for UK agriculture. *Crop Prot.* 31:85–93.

Hitaj, C., Smith, D. J., Code, A., Wechsler, S., Esker, P. D., and Douglas, M. R. 2020. Sowing Uncertainty: What We Do and Don't Know about the Planting of Pesticide-Treated Seed. *Bioscience.* 70:390–403 Available at: <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa019>.

Horst, R. K. 2013. Damping-Off. In *Westcott's Plant Disease Handbook*, Dordrecht: Springer Netherlands, p. 177. Available at: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-2141-8_25.

Jacobsen, K. L., Gallagher, R. S., Burnham, M., Bradley, B. B., Larson, Z. M., Walker, C. W., et al. 2010. Mitigation of Seed Germination Impediments in Hairy Vetch. *Agron. J.* 102:1346–1351 Available at: <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0002n>.

Keeling, J. W., Matches, A. G., Brown, C. P., and Karnezos, T. P. 1996. Comparison of Interseeded Legumes and Small Grains for Cover Crop Establishment in Cotton. *Agron. J.* 88:219–222 Available at: <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800020017x>.

Kennedy, T. F., and Connery, J. 2008. An Investigation of Seed Treatments for the Control of Crow Damage to Newly-Sown Wheat. *Irish J. Agric. Food Res.* 47:79–91 Available at: <http://www.jstor.org/stable/25564577>.

Khan, H. A., Javed, M., and Zeeshan, M. 2015. Damage assessment and management strategies for house crow (*Corvus splendens* L) on the seedling stages of maize and wheat in an irrigated agricultural farmland of Punjab, Pakistan. *J. Entomol. Zool. Stud.* 3:151–155.

Knapp, S., and van der Heijden, M. G. A. 2018. A global meta-analysis of yield stability in organic and conservation agriculture. *Nat. Commun.* 9:3632 Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05956-1>.

Kudsk, P., and Jensen, J. E. 2014. Experiences with implementation and adoption of integrated pest management in Denmark. In *Integrated Pest Management, experiences with implementation, global overview*, eds. R Peshin and D Pimentel. Springer Netherlands, p. 468–485.

Landi, S., Papini, R., d'Errico, G., Barzanti, G. P., and Roversi, P. F. 2018. Nematode indicators as integrative measures of soil condition during conversion from conventional to organic rice production in Italy: a case study. *Biol. Agric. Hortic.* 34:141–153 Available at: <https://doi.org/10.1080/01448765.2017.1399166>.

Leach, A. W., and Mumford, J. D. 2008. Pesticide Environmental Accounting: A method for assessing the external costs of individual pesticide applications. *Environ. Pollut.* 151:139–147.

Lecomte, V., and Longueval, C. 2013. Implantation : difficile de trop simplifier en tournesol. *Perspect. Agric.* 402:50–54.

Li, Y., Miao, R., and Khanna, M. 2020. Neonicotinoids and decline in bird biodiversity in the United States. *Nat. Sustain.* 3:1027–1035 Available at: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0582-x>.

Lundin, O., Malsher, G., Högfeldt, C., and Bommarco, R. 2020. Pest management and yield in spring oilseed rape without neonicotinoid seed treatments. *Crop Prot.* 137:105261 Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219420301940>.

Lupatini, M., Korthals, G. W., de Hollander, M., Janssens, T. K. S., and Kuramae, E. E. 2017. Soil Microbiome Is More Heterogeneous in Organic Than in Conventional Farming System. *Front. Microbiol.* 7:2064 Available at: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2016.02064>.

MAAF. 2018. <https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest>.

Main, A. R., Webb, E. B., Goynes, K. W., and Mengel, D. 2020. Reduced species richness of native bees in field margins associated with neonicotinoid concentrations in non-target soils. *Agric. Ecosyst. Environ.* 287:106693 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880919303093>.

Mangan, F., DeGregorio, R., Schonbeck, M., Herbert, S., Guillard, K., Hazzard, R., et al. 1995. Cover Cropping Systems for Brassicas in the Northeastern United States. *J. Sustain. Agric.* 5:15–36 Available at: https://doi.org/10.1300/J064v05n03_04.

Matyjaszczyk, E., and Sobczak, J. 2017. Common EU registration rules and their effects on the availability of diverse plant protection products: A case study from oilseed rape and potato in 5 Member States. *Crop Prot.* 100:73–76 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219417301655>.

McKee, S., Anderson, A., Carlisle, K., and Shwiff, S. A. 2020. Economic estimates of invasive wild pig damage to crops in 12 US states. *Crop Prot.* 132:105105 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219420300387>.

Meeks, M., Murray, S. C., Hague, S., and Hays, D. 2013. Measuring Maize Seedling Drought Response in Search of Tolerant Germplasm. *Agronomy.* 3:135–147 Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4395/3/1/135>.

Men, X., Ge, F., Yardim, E., and Parajulee, M. 2004. Evaluation of winter wheat as a potential relay crop for enhancing biological control of cotton aphids. *BioControl.* 49:701–714 Available at: <https://doi.org/10.1007/s10526-004-5278-z>.

Miao, Y., Stewart, B. A., and Zhang, F. 2011. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 31:397–414 Available at: <https://doi.org/10.1051/agro/2010034>.

Minette, S. 2020. MERCI: Méthode d'Estimation des Restitutions par les Cultures Intermédiaires - Acquis et Perspectives. :9.

Moreau-Valancogne, P., Coste, F., Crozat, Y., and Durr, C. 2008. Field emergence of bean seed lots: characterisation, modelling and simulation. *Eur. J. Agron.* 28:309–320.

Morris, C. E., Lamichhane, J. R., Nikolić, I., Stanković, S., and Moury, B. 2019. The overlapping continuum of host range among strains in the *Pseudomonas syringae* complex. *Phytopathol. Res.* Available at: <http://doi.org/10.1186/s42483-018-0010-6>.

Moshgani, M., Kolvoort, E., and de Jong, T. J. 2014. Pronounced effects of slug herbivory on seedling recruitment of Brassica cultivars and accessions, especially those with low levels of aliphatic glucosinolates. *Basic Appl. Ecol.* 15:607–615 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S143917911400111X>.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., et al. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature.* 463:747–756 Available at: <https://doi.org/10.1038/nature08823>.

Mourtzinis, S., Krupke, C. H., Esker, P. D., Varenhorst, A., Arneson, N. J., Bradley, C. A., et al. 2019. Neonicotinoid seed treatments of soybean provide negligible benefits to US farmers. *Sci. Rep.* 9:11207 Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47442-8>.

Nasu, H., and Matsuda, L. 1976. The damage to soybean by pigeons and doves and its control methods. *Agr. Hort.* 51:563–566.

Nettles, R., Watkins, J., Ricks, K., Boyer, M., Licht, M., Atwood, L. W., et al. 2016. Influence of pesticide seed treatments on rhizosphere fungal and bacterial communities and leaf fungal endophyte communities in maize and soybean. *Appl. Soil Ecol.* 102:61–69 Available at:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139316300427>.

Norgrove, L. 2021. Trade-offs in maize seedling losses in African grasslands. *Crop Prot.* 146:105676 Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219421001460>.

Oerke, E. C. 2006. Crop losses to pests. *J. Agric. Sci.* 144:31–43.

Parajulee, M. N., and Slosser, J. E. 1999. Evaluation of potential relay strip crops for predator enhancement in Texas cotton. *Int. J. Pest Manag.* 45:275–286 Available at: <https://doi.org/10.1080/096708799227680>.

Pereira, L. C., de Carvalho, C., Suzukawa, A. K., Correia, L. V., Pereira, R. C., dos Santos, R. F., et al. 2020. Toxicity of seed-applied pesticides to *Azospirillum* spp.: an approach based on bacterial count in the maize rhizosphere. *Seed Sci. Technol.* 48:241–246 Available at: <https://www.ingentaconnect.com/content/ista/sst/2020/00000048/00000002/art00011>.

Pretty, J., Brett, C., Gee, D., Hine, R., Mason, C., Morison, J., et al. 2001. Policy Challenges and Priorities for Internalizing the Externalities of Modern Agriculture. *J. Environ. Plan. Manag.* 44:263–283.

Qi, G., Chen, S., Ke, L., Ma, G., and Zhao, X. 2020. Cover crops restore declining soil properties and suppress bacterial wilt by regulating rhizosphere bacterial communities and improving soil nutrient contents. *Microbiol. Res.* 238:126505 Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0944501320303736>.

Queen, A., Earl, H., and Deen, W. 2009. Light and Moisture Competition Effects on Biomass of Red Clover Underseeded To Winter Wheat. *Agron. J.* 101:1511–1521 Available at: <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0163>.

Radford, B. J., and Allsopp, P. G. 1987. Use of insecticides and a press wheel to control soil insects affecting sorghum and sunflower establishment in southern Queensland. *Aust. J. Entomol.* 26:161–167 Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1440-6055.1987.tb00279.x>.

Ray, D. K., Ramankutty, N., Mueller, N. D., West, P. C., and Foley, J. a. 2012. Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nat. Commun.* 3:1293.

Reda, F., Verkleij, J. A. C., and Ernst, W. H. O. 2005. Relay Cropping of Sorghum and Legume Shrubs for Crop Yield Improvement and Striga Control in the Subsistence Agriculture Region of Tigray (Northern Ethiopia). *J. Agron. Crop Sci.* 191:20–26 Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2004.00126.x>.

Regan, K. H., Voortman, C. A., Wallace, J. M., and Barbercheck, M. E. 2020. Prevalence of Early- and Late-Season Pest Damage to Corn in Cover Crop-Based Reduced-Tillage Organic Systems. *Environ. Entomol.* 49:865–875 Available at: <https://doi.org/10.1093/ee/nvaa071>.

Reganold, J. P., and Wachter, J. M. 2016. Organic agriculture in the twenty-first century. *Nat. Plants.* 2:15221 Available at: <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.221>.

Rojas, J. A., Jacobs, J. L., Napieralski, S., Karaj, B., Bradley, C. A., Chase, T., et al. 2016. Oomycete Species Associated with Soybean Seedlings in North America—Part II: Diversity and Ecology in Relation to Environmental and Edaphic Factors. *Phytopathology.* 107:293–304 Available at: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-16-0176-R>.

Rossman, D. R., Byrne, A. M., and Chilvers, M. I. 2018. Profitability and efficacy of soybean seed treatment in Michigan. *Crop Prot.* 114:44–52.

- Rundlof, M., Andersson, G. K. S., Bommarco, R., Fries, I., Hederstrom, V., Herbertsson, L., et al. 2015. Seed coating with a neonicotinoid insecticide negatively affects wild bees. *Nature*. 521:77–80 Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/nature14420>.
- Santini, A., Ghelardini, L., De Pace, C., Desprez-Loustau, M. L., Capretti, P., Chandelier, A., et al. 2013. Biogeographical patterns and determinants of invasion by forest pathogens in Europe. *New Phytol.* 197:238–250 Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04364.x>.
- Sappington, T. W., Hesler, L. S., Allen, K. C., Luttrell, R. G., and Papiernik, S. K. 2018. Prevalence of Sporadic Insect Pests of Seedling Corn and Factors Affecting Risk of Infestation. *J. Integr. Pest Manag.* 9 Available at: <https://doi.org/10.1093/jipm/pmx020>.
- Sausse, C., Chevalot, A., and Lévy, M. 2021. Hungry birds are a major threat for sunflower seedlings in France. *Crop Prot.* :105712 Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219421001824>.
- Sausse, C., and Lévy, M. 2021. Bird damage to sunflower: international situation and prospects. *OCL.* 28:<https://doi.org/10.1051/ocl/2021020> Available at: <https://doi.org/10.1051/ocl/2021020>.
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., and Nelson, A. 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nat. Ecol. Evol.* 3:430–439 Available at: <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>.
- Schillinger, W. F., and Werner, S. J. 2016. Horned lark damage to pre-emerged canola seedlings. *Ind. Crops Prod.* 89:465–467 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669016303764>.
- Schipanski, M. E., Barbercheck, M., Douglas, M. R., Finney, D. M., Haider, K., Kaye, J. P., et al. 2014. A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. *Agric. Syst.* 125:12–22 Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X13001492>.
- Scortichini, M., Marcelletti, S., Ferrante, P., Petriccione, M., and Firrao, G. 2012. *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*: a re-emerging, multi-faceted, pandemic pathogen. *Mol. Plant Pathol.* 13:631–640 Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2012.00788.x>.
- Seifert, C. A., and Lobell, D. B. 2015. Response of double cropping suitability to climate change in the United States. *Environ. Res. Lett.* 10:24002 Available at: <https://doi.org/10.1088%2F1748-9326%2F10%2F2%2F024002>.
- Serrano, M., and Robertson, A. E. 2018. The effect of cold stress on damping-off of soybean caused by *Pythium sylvaticum*. *Plant Dis.* 102:2194–2200.
- Shenge, K. C., Mabagala, R. B., Mortensen, C. N., and Wydra, K. 2014. Resistance of *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria* isolates from Tanzania to copper and implications for bacterial spot management. *African J. Microbiol. Res.* 8:2881–2885.
- Simpson, R. J., Richardson, A. E., Riley, I. T., McKay, A. C., McKay, S. F., Ballard, R. A., et al. 2011. Damage to roots of *Trifolium subterraneum* L. (subterranean clover), failure of seedlings to establish and the presence of root pathogens during autumn-winter. *Grass Forage Sci.*
- Singer, J. W., Casler, M. D., and Kohler, K. A. 2006. Wheat Effect on Frost-Seeded Red Clover Cultivar Establishment and Yield. *Agron. J.* 98:265–269 Available at: <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0037>.
- Snapp, S. S., Swinton, S. M., Labarta, R., Mutch, D., Black, J. R., Leep, R., et al. 2005. Evaluating cover

- crops for benefits, costs and performance within cropping system niches. *Agron. J.* 97:322–332.
- Stockstad, E., and Grullon, G. 2013. Pesticide planet. *Science* (80-.). 341:730–731.
- Sundin, G. W., and Wang, N. 2018. Antibiotic Resistance in Plant-Pathogenic Bacteria. *Annu. Rev. Phytopathol.* 56:161–180 Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-045946>.
- Tanveer, M., Anjum, S. A., Hussain, S., Cerdà, A., and Ashraf, U. 2017. Relay cropping as a sustainable approach: problems and opportunities for sustainable crop production. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24:6973–6988 Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8371-4>.
- Tegtmeier, E. M., and Duffy, M. D. 2004. External costs of agricultural production in the United States. *Int. J. Agric. Sustain.* 2:1–20.
- Tous, J., Girona, J., and Tacias, J. 1994. Cultural practices and costs in hazelnut production. *Acta Hortic.* 351:395–418.
- Tribouillois, H., Constantin, J., and Justes, E. 2018. Analysis and modeling of cover crop emergence: Accuracy of a static model and the dynamic STICS soil-crop model. *Eur. J. Agron.*
- Tribouillois, H., Dürr, C., Demilly, D., Wagner, M. H., and Justes, E. 2016. Determination of germination response to temperature and water potential for a wide range of cover crop species and related functional groups. *PLoS One*.
- Vasanthakumari, M. M., Shridhar, J., Madhura, R. J., Nandhitha, M., Kasthuri, C., Janardhana, B., et al. 2019. Role of endophytes in early seedling growth of plants: a test using systemic fungicide seed treatment. *Plant Physiol. Reports.* 24:86–95 Available at: <https://doi.org/10.1007/s40502-018-0404-6>.
- Vasanthakumari, M. M., Shridhar, J., Madhura, R. J., Nandhitha, M., Kasthuri, C., Janardhana, B., et al. 2018. Role of endophytes in early seedling growth of plants: a test using systemic fungicide seed treatment. *Indian J. Plant Physiol.* Available at: <https://doi.org/10.1007/s40502-018-0404-6>.
- Waibel, H., and Fleischer, G. 1998. *Kosten und Nutzen des chemischen Pflanzenschutzes in der deutschen Landwirtschaft aus gesamtwirtschaftlicher Sicht (Social costs and benefits of chemical plant protection in German agriculture)*. Kiel, Vauk Verlag, Germany.
- Watson, C. A., Reckling, M., Preissel, S., Bachinger, J., Bergkvist, G., Kuhlman, T., et al. 2017. Chapter Four - Grain Legume Production and Use in European Agricultural Systems. In *Advances in Agronomy*, ed. Donald L Sparks. Academic Press, p. 235–303. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211317300202>.
- Wen, L., Lee-Marzano, S., Ortiz-Ribbing, L. M., Gruver, J., Hartman, G. L., and Eastburn, D. M. 2017. Suppression of Soilborne Diseases of Soybean With Cover Crops. *Plant Dis.* 101:1918–1928 Available at: <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-16-1067-RE>.
- Wendling, M., Charles, R., Herrera, J., Amossé, C., Jeangros, B., Walter, A., et al. 2019. Effect of species identity and diversity on biomass production and its stability in cover crop mixtures. *Agric. Ecosyst. Environ.* 281:81–91 Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880919301197>.
- White, D. J., Chen, W., and Schroeder, K. L. 2019. Assessing the contribution of ethaboxam in seed treatment cocktails for the management of metalaxyl-resistant *Pythium ultimum* var. *ultimum* in Pacific Northwest spring wheat production. *Crop Prot.* 115:7–12.

- White, K. E., and Hoppin, J. A. 2004. Seed treatment and its implication for fungicide exposure assessment. *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.* 14:195–203 Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/sj.jea.7500312>.
- Wijewardana, C., Reddy, K. R., Krutz, L. J., Gao, W., and Bellaloui, N. 2019. Drought stress has transgenerational effects on soybean seed germination and seedling vigor. *PLoS One.* 14:1–20 Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214977>.
- Wrather, A., Shannon, G., Balardin, R., Carrega, L., and Escobar, G. 2010. Effect of diseases on soybean yield in the top eight producing countries in 2006. *Plant Heal. Prog.* 11:29.
- Wright, L. N. 1971. Drought Influence on Germination and Seedling Emergence. *Drought Inj. Resist. Crop.* :19–44 Available at: <https://doi.org/10.2135/cssaspecpub2.c2>.
- Wyngaarden, S. L., Gaudin, A. C. M., Deen, W., and Martin, R. C. 2015. Expanding Red Clover (*Trifolium pratense*) Usage in the Corn–Soy–Wheat Rotation. *Sustainability.* 7:15487–15509 Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/7/11/15487>.
- You, M. P., Guo, K., Nicol, D., Kidd, D., Ryan, M. H., Foster, K., et al. 2017. Cultivation offers effective management of subterranean clover damping-off and root disease. *Grass Forage Sci.*
- You, M P, Guo, K., Nicol, D., Kidd, D., Ryan, M. H., Foster, K., et al. 2017. Cultivation offers effective management of subterranean clover damping-off and root disease. *Grass Forage Sci.* 72:785–793 Available at: <http://dx.doi.org/10.1111/gfs.12282>.
- You, M. P., Lamichhane, J. R., Aubertot, J.-N., and Barbetti, M. J. 2020. Understanding why Effective Fungicides against Individual Soilborne Pathogens are Ineffective with Soilborne Pathogen Complexes. *Plant Dis.* 104:904–920 Available at: <http://doi.org/10.1094/pdis-06-19-1252-re>.
- You, M. P., Rensing, K., Renton, M., and Barbetti, M. J. 2018. Critical factors driving *Aphanomyces* damping-off and root disease in clover revealed and explained. *Plant Pathology. Plant Pathol.*
- You, Ming P, Rensing, K., Renton, M., and Barbetti, M. J. 2017. Modeling Effects of Temperature, Soil, Moisture, Nutrition and Variety As Determinants of Severity of *Pythium* Damping-Off and Root Disease in Subterranean Clover. *Front. Microbiol.* 8:2223 Available at: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2017.02223>.
- Young, J. M. 2004. Olive knots and its pathogen. *Australas. Plant Pathol.* 33:33–39.
- Yu, L., Boyd, N. S., and Guan, Z. 2018. Relay-cropping and Fallow Programs for Strawberry-based Production System: Effects on Crop Productivity and Weed Control. *HortScience.* 53:445–450.
- Zaller, J. G., König, N., Tiefenbacher, A., Muraoka, Y., Querner, P., Ratzenböck, A., et al. 2016. Pesticide seed dressings can affect the activity of various soil organisms and reduce decomposition of plant material. *BMC Ecol.* 16:37 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4989535/>.
- Zhang, L., van der Werf, W., Bastiaans, L., Zhang, S., Li, B., and Spiertz, J. H. J. 2008. Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton. *F. Crop. Res.* 107:29–42 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429007002638>.
- Zubrod, J. P., Bundschuh, M., Arts, G., Brühl, C. A., Imfeld, G., Knäbel, A., et al. 2019. Fungicides: An Overlooked Pesticide Class? *Environ. Sci. Technol.* 53:3347–3365 Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04392>.

