



HAL
open science

Gestion des adventices dans un contexte de réduction des intrants de synthèse

Jean-Philippe Guillemin

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Guillemin. Gestion des adventices dans un contexte de réduction des intrants de synthèse. Sciences de l'environnement. Université de Bourgogne Franche-Comté, 2018. tel-03466602

HAL Id: tel-03466602

<https://hal.inrae.fr/tel-03466602v1>

Submitted on 6 Dec 2021

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.



Document présenté en vue de l'obtention de
l'habilitation à diriger des recherches

Soutenue le 15 novembre 2018

Gestion des adventices dans un contexte de réduction des intrants de synthèse

Jean-Philippe Guillemin

Mâitre de Conférences hors classe, AgroSup Dijon
Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA)

CNECA n°5

Section CNU : n°68 (Biologie des organismes)

Grandeur des espèces (Michel Serres)

« Leçon intégrale enfin : toutes les espèces vivantes, bactéries, champignons, faune, baleine, flore, séquoias, oui, toutes eurent leur chance dans cette vive et sinistre galère et, tout à tour, après avoir gagné, se résignèrent et entrèrent en forêt commune, en compagnie des autres, pour la petite guerre de tous les jours et de tous contre tous, où qui perd gagne, où qui gagne perd, et où, finalement, tout le monde finit par se reproduire et manger »



Philippe Geluck

Remerciements

Mes activités de recherche depuis mon recrutement à l'ENITA (devenue ENESAD puis AgroSup) au sein de différentes structures de recherche (équipe "*Composantes biologiques de la fertilité*" de l'ENESAD, UMR Biologie et Gestion des Adventices puis UMR Agroécologie) ont été réalisées en interaction et en collaboration avec de nombreuses personnes. Je tiens à remercier vivement toutes ces personnes (enseignants-chercheurs, chercheurs, ingénieurs, techniciens, étudiants, agriculteurs, ...).

Je remercie l'ensemble de mes collègues AgroSup, Inra et Université de Bourgogne, tant le personnel enseignant, chercheur, technique et administratif, sans eux la réalisation et la valorisation de mes activités de recherche n'auraient jamais pu se concrétiser. J'ai évidemment des pensées particulières pour certaines personnes :

Merci à Bruno de me permettre d'avoir un "pied à terre" à l'Inra, et pour ses encouragements ;

Merci à Henri pour sa confiance et tout ce qu'il m'a appris durant et après l'encadrement de la thèse de Solène ;

Merci à Christian S. d'avoir relevé le pari de la recherche sur les "bioherbicides" ;

Merci à Carole pour son professionnalisme (quel que soit l'heure et le jour de la semaine (chut !)) ;

Merci à Luc pour son investissement sans faille (mais pas sans) à Fenay ;

Merci à Stéphane pour ces encouragements écrits et oraux à soutenir mon HDR ;

Merci à Etienne et Wilfried, les deux "petits jeunes" du couloir de la Combe Berthaux pour leurs encouragements ;

Merci à Jean-Michel de m'avoir fait confiance pour permettre mon recrutement à l'ENITA ;

Merci à Bruno, Bernard, Sandrine et Henri d'avoir pris le temps de relire ce document ;

Parmi les collègues, j'ai une pensée plus particulière, en prenant le risque d'en oublier, pour Nathalie, Antoine, Sylvie, Fabrice, Christophe, Valérie, Marc, Chantal, Jean-Pierre, Eric, Jean-Paul, Christelle, Richard, Christian G., Jacques, Nicolas M.N., Nicolas C.P.B..

Je tiens à remercier l'ensemble des stagiaires que j'ai eu l'occasion d'encadrer ou de co-encadrer, et qui m'ont permis d'avancer dans mes activités de recherche. Sans eux, ce document n'aurait jamais pu être rédigé. C'est une chance et une richesse d'encadrer chaque année de nouveaux stagiaires avec des personnalités et des attentes variées. J'ai évidemment une pensée toute particulière pour les trois "thésards" que j'ai co-encadrés Andrej, Solène et Marion.

Je remercie les membres du jury qui ont bien voulu participer à la soutenance et donc prendre le temps de lire et commenter mon document, Josiane Le Corff, Philippe Debaeke, Christophe Mougel, Fabrice Martin et Sylvain Jeandroz. J'espère vous avoir convaincu que le devenir des adventices reste une problématique centrale dans la production agricole.

Enfin merci à ma famille, Michèle, Matthieu, Apolline et Hippolyte de m'avoir supporté pendant cette longue phase "d'accouchement" de ce document.

Listes des espèces adventices citées dans le texte

Nom scientifique (et synonyme)

Alopecurus myosuroides Hudson
Amaranthus hybridus L.
Amaranthus retroflexus L.
Ambrosia artemisiifolia L.
Anisanthia sterilis (L.) Nevski
Apera spica-venti (L.) P.Beauv.
Arabidopsis thaliana (L.) Heynh
Avena fatua L.
Capsella bursa-pastoris (L.) Medicus
Chenopodium album L.
Cirsium arvense (L.) Scop.
Convolvulus arvensis L.
Cyanus segetum Hill (= *Centaurea cyanus* L.)
Digitaria sanguinalis (L.) Scop.
Echinochloa crus-galli (L.) P.Beauv.
Elytrigia repens (L.) Nevski
Euphorbia helioscopia L.
Fallopia convolvulus (L.) Löve
Galium aparine L.
Geranium dissectum L.
Helminthotheca echioides (L.) Holub (= *Picris echioides* L.)
Lamium purpureum L.
Lolium spp.
Lysimachia arvensis (L.) U.Manns & Anderb. (= *Anagallis arvensis* L.)
Medicago lupulina (L.)
Myosotis arvensis Hill
Papaver rhoeas L.
Persicaria lapathifolia (L.) Delarbre (= *Polygonum lapathifolium* L.)
Phelipanche ramosa (L.) Pomel
Poa annua L.
Polygonum aviculare L.
Rumex obtusifolius L.
Senecio vulgaris L.
Setaria pumila (Poir.) Roemer et Schultes
Setaria italica subsp. *viridis* (L.) Thell. (= *Setaria viridis* L.)
Sinapsis arvensis L.
Solanum nigrum L.
Sonchus asper (L.) Hill
Stellaria media (L.) Villars
Trifolium arvense L.
Tripleurospermum inodorum Sch.Bip. (= *Matricaria perforata* Mérat)
Veronica hederifolia L.
Veronica persica Poir.
Viola arvensis Murray
Vulpia myuros (L.) Gmel.

Sommaire

Curriculum vitae

| | |
|---|----|
| Etat civil et Formation | 1 |
| Liste des publications | 2 |
| Synthèse des activités de recherche | 11 |
| Synthèse des activités d'expertise et développement | 16 |
| Synthèse des activités d'enseignement et de formation | 17 |
| Synthèse des responsabilités et services rendus | 20 |

Les travaux de recherche et le projet de recherche

| | |
|---|----|
| I. Contexte général des travaux de recherche | 21 |
| I.1 - Préambule | 21 |
| I.2 – Des éléments de contexte sur les adventices | 22 |
| I.3 – Contexte de mes travaux sur les adventices | 24 |
| II. La nuisibilité des adventices | 27 |
| II.1 - Etude du niveau de nuisibilité des adventices | 27 |
| II.2 - Compréhension de la concurrence exercée par les adventices | 31 |
| II.2.1 - Analyse de la concurrence dans une parcelle cultivée | 31 |
| II.2.2 – Capacité de compétition de différentes adventices | 33 |
| II.3 – Intérêt de la gestion des adventices en production végétale | 34 |
| III. Les impacts de l'intensification de la production sur les adventices | 39 |
| III.1 - Développement de la résistance aux herbicides chez le vulpin | 40 |
| III.1.1 – Importance de la résistance aux herbicides chez le vulpin en Côte d'Or | 40 |
| III.1.2 - Résistance aux herbicides chez le vulpin à l'échelle française | 41 |
| III.1.3 - Résistance aux herbicides chez le vulpin à l'échelle européenne | 43 |
| III.2 – Evolution du système reproducteur du bleuet | 44 |
| IV. Acquisition de connaissance sur les adventices | 48 |
| IV.1 – Persistance et dormance des semences dans le stock semencier | 49 |
| IV.2 - Phase germination/levée des adventices | 51 |
| IV.2.1 - Exigences en température et humidité du sol pour la germination | 51 |
| IV.2.2 – Effet de conditions environnementales sur la germination | 53 |
| IV.2.3 – Effet de la qualité des semences sur la germination | 54 |
| IV.2.4 – Effet de la position des semences dans le sol sur la germination/levée | 55 |
| IV.2.4.1 – Emergence dans le contexte de non travail du sol et de présence de couvert végétal | 55 |
| IV.2.4.2 – Effet de l'enfouissement des semences | 57 |
| IV.3 - Phase Floraison – Reproduction des adventices | 58 |
| IV.4 – Réflectance des feuilles d'adventices | 61 |
| IV.5 - Utilisation des données acquises sur les adventices | 62 |
| V. Evolution de la gestion des adventices | 65 |
| V.1 – Effet de l'évolution de la réglementation sur la disponibilité en herbicide | 65 |
| V.2 – Gestion intégrée d'adventices résistantes aux herbicides | 67 |
| "En perspective du projet de recherche" | 69 |

| | |
|---|-----|
| VI. Projet de recherche | 71 |
| VI.1 – Recherche de candidats à activité herbicide dans le cadre du biocontrôle | 72 |
| VI.1.1 – Etat des lieux des candidats au biocontrôle pour la gestion des adventices | 72 |
| VI.1.2 – Recherche de candidats de type microorganisme à action herbicide | 75 |
| VI.1.2.1 – Recherche de candidats à l'échelle de la plante | 76 |
| VI.1.2.1.1 – Recherche de candidats sur les parties aériennes | 77 |
| VI.1.2.1.2 – Recherche de candidats pour les semences ou plantules | 81 |
| VI.1.2.2 – Recherche de candidats <i>via</i> des études de co-occurrence de communautés | 83 |
| VI.2 – Evaluation du stock semencier d'adventices | 87 |
| VII. En terme de Discussion-Conclusion | 90 |
| <i>Bibliographie</i> | 93 |
| <i>Annexes</i> | 101 |
| Annexe 1 : Dispositif expérimental développé au cours de ma thèse | 102 |
| Annexe 2 : Expérimentation « analyse de la concurrence oignon/adventice » | 103 |
| Annexe 3 : Successions culturales et stratégies de gestion testées sur l'expérimentation « vulpin résistant » | 104 |

Curriculum vitae

Etat civil et Formations

Jean-Philippe Guillemain
Né le 8 avril 1966 à Lons le Saunier
Marié, trois enfants

Situation professionnelle

1990-91 : Moniteur d'enseignement supérieur en Biologie Végétale, Université de Bourgogne.
1991-92 : Attaché temporaire de vacation en Biologie Végétale et Physiologie Végétale, Université de Bourgogne.
1992-93 : Chef de travaux contractuel en Agronomie et Productions Végétales à l'Ecole Nationale d'Ingénieur des Techniques Agricoles (ENITA) de Dijon-Quetigny.
1993-96 : Chef de Travaux puis Maître de Conférences contractuel en Agronomie et Productions Végétales à l'Etablissement National d'Enseignement Supérieur Agronomique de Dijon (ENESAD).
1996 : Reçu au concours de Maître de Conférences en "Agronomie, composantes biologiques de la fertilité" (MC-06-304) à l'ENESAD.
1997 : Prise de fonction au Département "Sciences et Techniques Agronomiques" devenu Département "Agronomie et Environnement" de l'ENESAD devenu AgroSup Dijon (Institut National Supérieur des sciences agronomiques, de l'alimentation et de l'environnement).
Maître de conférences en Agronomie depuis le 1 janvier 1997
Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt
Section CNECA n°5 (Productions Végétales) – discipline "Agronomie et Productions Végétales"

AgroSup Dijon
Département "Agronomie, Agroéquipement, Elevage et Environnement" (2A2E)
UMR 1347 Agroécologie (AgroSup – Inra- Université de Bourgogne)
26 bd Docteur Petitjean
BP 87999
21079 Dijon Cedex
tél. : 03 80 77 28 72 fax : 03 80 77 27 50
adresse électronique : jean-philippe.guillemain@agrosupdijon.fr

Titres universitaires

1988 : Maîtrise de Biologie des Organismes (option Sciences Naturelles), Université de Franche-Comté.
1989 : DEA Biochimie et Biologie Cellulaire et Moléculaire, Université de Bourgogne.
1994 : Doctorat d'Université, UFR : Science de la vie (spécialité : biologie des relations plantes/micro-organismes), mention très honorable avec les félicitations du jury, Université de Bourgogne.
Thèse d'Université, 1994. Contribution des endomycorhizes à la production d'ananas micropropagés (*Ananas comosus* (L.) Merr). Université de Bourgogne. Laboratoire de Phytoparasitologie, INRA-CNRS, INRA de Dijon.

Jury de soutenance :

Y.R. Dommergues, rapporteur, directeur de recherche CNRS
J. Marchal, rapporteur, directeur de recherche CIRAD
J. Monin, présidente du jury, professeur à l'Université de Bourgogne
V. Gianinazzi-Pearson, examinatrice, directeur de recherche CNRS
Y. Mathieu, examinateur, directeur de production chez Vitropic
S. Gianinazzi, directeur de thèse, directeur de recherche CNRS

Liste des publications

▪ **Publications internationales à comité de lecture [ACL]**

- [ACL01] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., Gianinazzi-Pearson V., **1991**. L'endomycorhization de vitroplants d'*Ananas comosus* : mise en évidence d'un effet mycorhizien. *Fruits*, 46, 355-358.
- [ACL02] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., **1992**. Screening of VA endomycorrhiza fungi for establishment of micropropagated pineapple plants. *agronomie*, 12, 831-836.
- [ACL03] Lovato P., **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., **1992**. Application of commercial (V)AM fungal inoculants to the establishment of micropropagated grapevine rootstock and pineapple plants. *agronomie*, 12, 873-880.
- [ACL04] **Guillemin J.P.**, Abdel-Fattah G., Trouvelot A., Gianinazzi S., Gianinazzi-Pearson V., **1993**. Interactions between soil-applied fungicides, endomycorrhiza fungal activity and plant growth. *Trends in Agricultural Sciences-Soil Sciences*, 1, 161-172.
- [ACL05] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., Gianinazzi-Pearson V., Marchal J., **1994**. Contribution of endomycorrhizas in biological protection of pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr) against *Phytophthora cinnamomi* Rands. *Agricultural Science in Finland*, 3, 241-251.
- [ACL06] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., Gianinazzi-Pearson V., Marchal J., **1994**. Control by arbuscular endomycorrhizae of root colonisation by *Pratylenchus brachyurus* in pineapple microplants. *Agricultural Science in Finland*, 3, 253-262.
- [ACL07] **Guillemin J.P.**, Orozco M.O., Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S., **1995**. Influence of phosphate fertilization on fungal alkaline phosphatase activity in relation arbuscular mycorrhizal effects on plant growth. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 53, 63-69.
- [ACL08] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., Gianinazzi-Pearson V., Marchal J., **1995**. Influence des endomycorhizes à arbuscules sur la croissance et la nutrition minérale d'ananas (*Ananas comosus* (L.) Merr) dans un sol à forte salinité. *Fruits*, 50(5), 329-337.
- [ACL09] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., Gianinazzi-Pearson V., **1997**. Endomycorrhiza biotechnology and micropropagated pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr). *Acta Horticulturae*, 425, 267-276.
- [ACL10] Chauvel B., **Guillemin J.P.**, Gasquez J., Colbach N., **2001**. Cropping system evaluation to control herbicide populations of black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.). *Crop Protection*, 20, 127-137.
- [ACL11] Lu J.W., Ma C., Zuo C.C., **Guillemin J.P.**, Gouton P., Coquille J.C., **2001**. Distinguishing onions and weeds in field by using color image. *Transactions of the CSAE*, 17 (5), 275-278.
- [ACL12] Vioix J.B., Douzals J.P., Truchetet F., Assemat L., **Guillemin J.P.**, **2002**. Spatial and spectral methods for weed detection and localization. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 7, 679-685.
- [ACL13] Chauvel B., **Guillemin J.P.**, Letouzé A., **2005**. Effect of intra-specific competition on development and growth of *Alopecurus myosuroides* Hudson. *European Journal of Agronomy*, 25 (3), 301-308.
- [ACL14] Susek A., Ivancic A., Lemoine M.C., **Guillemin J.P.**, Caneill J., Sisko M., Janzekovic F., Praprotnik L., **2005** Diversity in wild populations of Christmas rose (*Helleborus niger* L.) and its potential use for genetic breeding. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 47 (2), 129-135.
- [ACL15] Chauvel B., **Guillemin J.P.**, Dessaint F., Délye C., **2006**. Regional study of herbicide resistance of *Alopecurus myosuroides* Huds. in France. *Journal of Plant Diseases and Protection*, Special Issue XX, 57-64.
- [ACL16] Délye C., Menchari Y., **Guillemin J.P.**, Matějček A., Michel S., Camilleri C., Chauvel B., **2007**. Black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds) resistance to ACCase inhibitors in France. *Weed Research*, 47, 95-105.
- [ACL17] Cointault F., Guérin D., **Guillemin J.P.**, Chopinet B., **2008**. In-field wheat ears counting using color-texture image analysis. *New Zealand Journal on Crop and Horticulture*, 36 (2), 117-130.
- [ACL18] Chauvel B., **Guillemin J.P.**, Colbach N., **2009**. Evolution of an herbicide-resistant population of *Alopecurus myosuroides* Huds. in a long term cropping system experiment. *Crop Protection*, 28(4), 343-349.
- [ACL19] Gardarin A., **Guillemin J.P.**, Munier-Jolain N., Colbach N., **2010**. Estimation of key parameters for weed population dynamics models: base temperature and base water potential for germination. *European Journal of Agronomy*, 32(2), 162-168.

- [ACL20] Susek A., **Guillemin J.P.**, Lemoine M.C., Gollote A., Ivancic A., Caneill J., S. Gianinazzi, **2010**. Effect of rhizosphere bacteria and endomycorrhizal fungi on the growth of Christmas Rose (*Helleborus niger* L.). *European Journal of Horticultural Science*, 75(2) 85-88.
- [ACL21] Délye C., Michel S., Bérard A., Chauvel B., Brunel D., **Guillemin J.P.**, Dessaint F., **2010**. Structure and evolution of resistance to acetyl-coenzyme A carboxylase-inhibiting herbicides across the geographical range of the grass weed *A. myosuroides* Huds. (black-grass). *New Phytologist*, 186, 1005-1017.
- [ACL22] **Guillemin J.P.**, Chauvel B., **2011**. Effect of seed weight and burial depth on seed behaviour of *Ambrosia artemisiifolia* L.. *Weed Biology and Management*, 11(4), 217-223.
- [ACL23] Chauvel B., **Guillemin J.P.**, Gasquez J., Gauvrit C., **2012**. From weedkillers to environmentally benign herbicides: history of chemical weeding from 1944 to 2011 in France. *Crop Protection*, 42, 320-326.
- [ACL24] Bellanger S, **Guillemin J.P.**, Bretagnolle V., Darmency H., **2012**. *Centaurea cyanus* L. as a biological indicator of segetal species richness in arable field. *Weed Research*, 52(6), 551-563.
- [ACL25] **Guillemin J.P.**, Gardarin A., Granger S., Reibel C., Munier-Jolain N., Colbach N., **2013**. Assessing of base temperatures and base water potentials for germination of weeds. *Weed Research*, 53(1), 76-87.
- [ACL26] Constancias F., Chemidlin Prévost-Bouré N., Terrat S., Simon Aussems S., Nowak V., **Guillemin J.P.**, Bonnotte A., Biju-Duval L., Navel A., Martins J.M.F., Maron P.A., Ranjard L., **2014**. Microscale evidence for a high decrease of soil bacterial density and diversity by cropping. *Agronomy for sustainable Development*, 34, 831-840.
- [ACL27] Dessaint F., Biju-Duval L., Buthiot M., **Guillemin J.P.**, **2014**. Évaluer l'intensité de l'utilisation des pesticides dans les colzas d'hiver : cas de la zone d'étude de Féney. *OCL*, 21(1), A101.
- [ACL28] Bellanger S., **Guillemin J.P.**, Darmency H., **2014**. Pseudo-self-compatibility in *Centaurea cyanus* L.. *Flora*, 209, 325-331.
- [AS29] Le Corre V., Bellanger S, **Guillemin J.P.**, Darmency H., **2014**. Genetic diversity of the declining arable plant *Centaurea cyanus*: population fragmentation within an agricultural landscape is not associated with enhanced spatial genetic structure. *Weed Research*, 54(5), 436-444.
- [ACL30] Bellanger S., **Guillemin J.P.**, Touzeau S., Darmency H., **2015**. Consequences of inbreeding for *Centaurea cyanus* L., a self-incompatible segetal species. *Flora*, 212, 24-29.
- [ACL31] Cordeau S., **Guillemin J.P.**, Reibel C., Chauvel B., **2015**. Weed species differ in their ability to emerge in no-till systems that include cover crops. *Annals of Applied Biology*, 166(2), 444-455.
- [ACL32] Constancias F., Saby N.P.A., Terrat S., Dequiedt S., Horrigue W., Nowak V., **Guillemin J.P.**, Biju-Duval L., Chemidlin Prévost-Bouré N., Ranjard L., **2015**. Contrasting spatial patterns and ecological attributes of soil bacterial taxa across a landscape. *MicrobiologyOpen*, doi: 10.1002/mbo3.255.
- [ACL33] Constancias F., Terrat S., Saby N.P.A., Horrigue W., Villerd J., **Guillemin J.P.**, Biju-Duval L., Nowak V., Dequiedt S., Ranjard L., Chemidlin Prévost-Bouré N., **2015**. Mapping and determinism of soil microbial community distribution across an agricultural landscape. *MicrobiologyOpen*, doi: 10.1002/mbo3.256.
- [ACL34] Darmency H., Bellanger S., Matejcek A., **Guillemin J.P.**, **2016**. Long-day-dependent segetal species threatened by climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 216, 340-343.
- [ACL35] Cordeau S., Triolet M., Steinberg C., **Guillemin J.P.**, **2016**. Bioherbicides. *Crop Protection*, 87, 44-49.
- [ACL36] Quinio M., De Waele M., Dessaint F., Biju-Duval L., Buthiot M., Cadet E., Bybee-Finley K. A., **Guillemin J.P.**, Cordeau S., **2017**. Separating the confounding effects of farming practices on weed and winter wheat production using path modelling. *European Journal of Agronomy*, 82, 134-143.
- [ACL37] Gaba S., Perronne R., Fried G., Gardarin A., Bretagnolle F., Biju-Duval L., Colbach N., Cordeau S., Gauvrit C., Gibot-Leclerc S., **Guillemin J.P.**, Moreau D., Munier-Jolain N., Strbik F., Reboud X., **2017**. Response and effect traits of arable weeds in arable agro-ecosystems: a review of current knowledge. *Weed Research*. 57, 123-147.
- [ACL38] **Guillemin J.P.**, Bellanger S., Reibel C. Darmency H. **2017**. Longevity, dormancy and germination of *Cyanus segetum* L.. *Weed Research*, 57, 361-371.
- [ACL39] Cordeau S., Wayman S., Reibel C., Strbik F., Chauvel B., **Guillemin J.P.**, **2018**. Drought affects weed emergence according to seed burial depth and the presence of a cover crop. *Weed Biology and Management*, 18(1), 12-25.
- [ACL40] Beber C.L., da Rosa Couto R., Lovato P.E., **Guillemin J.P.**, Nicolardot B., Schenato R.B., Comin J.J., **2018**. Comparative agroenvironmental risks of pesticides in different cropping systems: application of

the I-Phy indicator. *Environmental Earth Sciences*, 77, 532-541.

[ACL41] Petit S., Cordeau S., Chauvel B., Bohan D., **Guillemin J.P.**, Steinberg C., **2018**. Biological control of arable weeds: a review of processes, field-based evidence and future challenges. *Accepté ASD*

▪ **Publications nationales à comité de lecture [PN]**

[PN01] Guérin D., Cointault F., Gée C. **Guillemin J.P.**, **2004**. Etude de la faisabilité d'un système de comptage d'épis de blé par vision. *Traitement du Signal*, 21(5), 549-560.

▪ **Articles de vulgarisation (revue sans comité de lecture)**

[AV01] Chauvel B., Gasquez J., Delattre M., **Guillemin J.P.**, **1998**. Lutte contre les vulpins résistants. Quels moyens agronomiques envisager ?. *Perspectives Agricoles*, 241, 84-89.

[AV02] Chauvel B., Jouy L., Verdier J.L., **Guillemin J.P.**, **2000**. Stratégie de lutte contre les vulpins résistants : conséquences économiques. *Perspectives agricoles*, 256, 72-78.

[AV03] **Guillemin J.P.**, Chauvel B., Delattre M., Dessaint F., Délye C., Matějček A., Bissot R., Klein J.N., Lagaudriere D., Radix A., Waeckel L., **2006**. Répartition de la résistance aux herbicides d'une mauvaise herbe. Cas du vulpin dans le département de la Côte d'Or. *Phytoma*, 589, 20-23.

[AV04] Délye C., Chauvel B., **Guillemin J.P.**, Menchari Y., Matějček A., Michel S., Camilleri C., Bérard A., Brunel D., Dessaint F., **2006**. La résistance du vulpin des champs aux anti-graminées dans les blés en France. La métabolisation : son importance crée une situation à risque. *Phytoma*, 598, 12-16.

[AV05] Gasquez J., **Guillemin J.P.**, C. Gauvrit, Chauvel B., **2010**. Lutte contre les mauvaises herbes en France, dix lustres en lumière. *Phytoma*, 639, 18-22.

[AV06] **Guillemin J.P.**, Biju-Duval L., Buthiot M., Dessaint F., **2013**. Pesticides sur blé tendre d'hiver, diversité dans le détail. *Phytoma*, 667, 43-46.

[AV07] **Guillemin J.P.**, *et al.*, **2014**. La conférence du COLUMA racontée par les étudiants d'AgroSup Dijon. *Phytoma*, 673, 8-10.

[AV08] Da Cunha Lobo M., Dusacre C., Foussard L., Graillat M., Perthame L., Petit M.A., Pitrois L., Thiret B., **Guillemin J.P.**, **2017**. Trois jours au cœur du COLUMA 2016. *Phytoma*, 703, 8-10.

[AV09] Da Cunha Lobo M., Dusacre C., Foussard L., Graillat M., Perthame L., Petit M.A., Pitrois L., Thiret B., **Guillemin J.P.**, **2017**. Débat : quel désherbage des cultures dans dix ans ? *Phytoma*, 703, 11-12.

[AV10] Cellier V., Aubertot J.-N., Cordeau S., Fontaine L., Froger M., Gardarin A., **Guillemin J.P.**, Lavigne C., Petit S., Rodriguez A., Sarthou J.-P., Valantin-Morison M. **2017**. Développements méthodologiques pour une Caractérisation SIMplifiée des pressions biotiques et des Régulations biologiques - CASIMIR. *Innovations Agronomiques*, 59, 41-54.

[AV11] Rodriguez A., Dessaint F., Darmency H., **Guillemin J.P.**, Cambecedes J., Garetta R., Gire L., Huc S., Jammes D., Pointereau P., Chardes M.C., Bardet O. **2018**. Conservation des plantes messicoles dans les parcelles cultivées : caractérisation des systèmes de cultures favorables, rôles fonctionnels, perception par la profession. *Innovations Agronomiques*, 63, 293-305

▪ **Participation à des chapitres d'ouvrage à comité de lecture**

[CO01] Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S., **Guillemin J.P.**, Trouvelot A., Duc G., **1991**. Genetic and cellular analysis of resistance to vesicular-arbuscular (VA) mycorrhizal fungi in pea mutants. Dans : *Advances in Molecular Genetics of Plant-Microbe Interactions*, Vol I., H. Hennecke and D.P.S. Veram, Eds. Kluwer, Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 336-342.

sans comité de lecture

[CO02] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., **1991**. Fungicide interactions with VA fungi in *Ananas comosus* L. grown in a tropical environment. Dans : *Mycorrhizas in Ecosystems*, D.J. Read, D.H. Lewis, A.H. Fitter and I.J. Alexander, Eds CAB International, Oxon, GB, 381.

[CO03] **Guillemin J.P.**, Lemoine M.C., Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S., **1995**. Influence of arbuscular and ericoid mycorrhiza formation on levels of photosynthetic pigments in host plant. Dans : *Mycorrhizas in integrated systems from genes to plant development*, C. Azcon-Aguilar and J.M. Barea, Research and Development, Bruxelles, 334-337.

- [CO04] Colbach N., Gardarin A., Granger S., **Guillemin J.P.**, Munier-Jolain N., **2008**. La modélisation au service de l'évaluation et de la conception des systèmes de culture intégrés. Dans : Carrefour de l'innovation agronomique, Maîtrise de la flore en grandes cultures, Eds INRA. 2 décembre 2008. 63-75.
- [CO05] Munier-Jolain N., Deytieux V., **Guillemin J.P.**, Granger S., Gaba S., **2008**. Conception et évaluation multicritères de prototypes de systèmes de culture dans le cadre de la Protection Intégrée contre la flore adventice en grandes cultures. Dans : Carrefour de l'innovation agronomique, Maîtrise de la flore en grandes cultures, Eds INRA. 2 décembre 2008. 77-90.
- [CO06] Triolet M., Cordeau S., Steinberg C., **Guillemin J.P.**, **2016**. Les Bioherbicides. Dans : Agriculture sans herbicides. Principes et méthodes. 2^{ème} édition. Ed. Agridécisions.

▪ **Ouvrages « techniques »**

Rodriguez A., Vacher C., Quilliot E., **Guillemin J.P.**, Munier-Jolain N., **2012**. Guide méthodologique de suivi de la flore adventice. RMT Florad. 18 p.

▪ **Communications à des congrès scientifiques avec actes**

- [AC01] **Guillemin J.P.**, Thomas J.M., **1998**. Nuisibilité des adventices dans une culture d'oignon. Dans : *Dix septième Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. ANPP Annales, Tome I, 63-70. (poster)
- [AC02] Thomas J.M., **Guillemin J.P.**, **1998**. Influence des mauvaises herbes sur le rendement énergétique de l'oignon repiqué de plein champ. Dans : *Dix septième Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. ANPP Annales, Tome I, 107-114. (communication orale)
- [AC03] Chauvel B., Delattre M., Gasquez J., **Guillemin J.P.**, **1998**. Essai de gestion d'une population de vulpin résistante aux herbicides. Dans : *Dix septième Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. ANPP Annales, Tome I, 117-124. (communication orale)
- [AC04] Thomas J.M., **Guillemin J.P.**, **2000**. Modélisation de la croissance de l'oignon cultivé en situation de concurrence avec les mauvaises herbes. *XI^{ème} International Conference on Weed Biology*. Dijon, France, 6-8 septembre. ANPP Annales, 289-296. (poster)
- [AC05] Granger S., **Guillemin J.P.**, **2001**. Estimation de la nuisibilité de différentes mauvaises herbes. Dans : *Dix huitième Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. ANPP Annales, Tome I, 11-16. (communication orale)
- [AC06] Granger S., **Guillemin J.P.**, **2004**. Impact of the morphology of two weed species on maize growth. *XII^{ème} International Conference on Weed Biology*. Dijon, France, 31 août -2 septembre. AFPP Annales, 31-35. (poster)
- [AC07] **Guillemin J.P.**, Thomas J.M., Granger S., **2004**. Effect of intraspecific competition on energy conversion of *Amaranthus retroflexus* L.. *XII^{ème} International Conference on Weed Biology*. Dijon, France, 31 août -2 septembre. AFPP Annales, 37-42. (communication orale)
- [AC08] Thomas J.M., **Guillemin J.P.**, Granger S., **2004**. Evaluation of intraspecific competition for *Amaranthus retroflexus* L.. *XII^{ème} International Conference on Weed Biology*. Dijon, France, 31 août -2 septembre. AFPP Annales, 43-49. (poster)
- [AC09] Gée Ch., **Guillemin J.P.**, Bonvarlet L., Magnin-Robert J.B., **2004**. Weed discrimination by reflectance measurements using neural networks. *XII^{ème} International Conference on Weed Biology*. Dijon, France, 31 août -2 septembre. AFPP Annales, 487-494. (communication orale)
- [AC10] Vioix J.B., Gée Ch., Douzals J.P., **Guillemin J.P.**, Truchetet F., **2004**. Développement d'outils "d'aide à la décision" pour la détection d'adventices. Dans : *Dix neuvième Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. AFPP Annales, CDRom. (communication orale)
- [AC11] Chauvel B., Colbach N., Delattre M. **Guillemin J.P.**, **2007**. Des pratiques agronomiques peuvent-elles permettre de gérer une mauvaise herbe résistante aux herbicides?. Dans : *Vingtième Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. AFPP, 11 et 12 décembre 2007, Dijon, 159-168. (communication orale)
- [AC12] Paoli J.B., Gée Ch., **Guillemin J.P.**, Truchetet F., Vioix J.B., **2007**. Dispositif d'imagerie multi-spectrale pour la détection et le contrôle des adventices. Dans : *Vingtième Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. AFPP, Dijon. 11 et 12 décembre 2007, 79-88. (communication orale)

- [AC13] Bellanger S., Darmency H., **Guillemin J.P.**, 2009. Relation entre la flore adventice des parcelles cultivées et *Centaurea cyanus*. *XIII^{ème} International Conference on Weed Biology*. Dijon, France, 8-10 septembre 2009, 8-15. (communication orale)
- [AC14] Munier-Jolain N., Deytieux V., **Guillemin J.P.**, Granger S., Gaba S., 2009. Multi-criteria evaluation of cropping systems prototypes based on Integrated Weed Management. *XIII^{ème} International Conference on Weed Biology*. Dijon, France, 8-10 septembre 2009. 268-277. (poster)
- [AC15] **Guillemin J.P.**, D. Bonduelle, S. Juillet, A. Lakhmi, M. Mazel, J. Gasquez, B. Chauvel, 2010. Histoire de l'utilisation des herbicides sur deux grandes cultures en France. Dans : *Vingtième une Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. AFPP, Dijon. 8 et 9 décembre 2010, 506-513. (poster)
- [AC16] J. Gasquez, **Guillemin J.P.**, C. Gauvrit, B. Chauvel, 2010. Historique de l'utilisation des herbicides en France : premières analyses. Dans : *Vingtième une Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. AFPP, Dijon. 8 et 9 décembre 2010, 291-301. (poster)
- [AC17] C. Reibel, **Guillemin J.P.**, C. Gauvrit, B. Chauvel, 2010. Aptitude à la levée et à l'installation d'adventices dans des bandes enherbées. Dans : *Vingtième une Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. AFPP, Dijon. 8 et 9 décembre 2010, 177-184. (poster)
- [AC18] Chauvel B., Martinez Q., **Guillemin J.P.**, 2012. Importance of seeds in the process of common ragweed invasion. Dans : *International Symposium on Current Trends in Plant Protection*. Belgrade, Serbie, 25 – 28th September. 70-78. (communication orale)
- [AC19] Gasquez J., **Guillemin J.P.**, Gauvrit C., Chauvel B., 2013. Réduction du nombre de molécules herbicides : conséquences par culture. Problématique particulière de la gestion de la flore adventice. Dans : *22^{ème} Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. AFPP, Dijon. 10-12 décembre (communication orale)
- [AC20] Lieven J., Waller F., Pontet C., Rodriguez A., **Guillemin J.P.**, Bonin L., Ravenel C., Fontaine L., Quilliot E., 2013. INFLOWEB : un site pédagogique sur les adventices pour aider à leur gestion intégrée. Dans : *22^{ème} Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. AFPP, Dijon. 10-12 décembre (communication orale)
- [AC21] Rodriguez A., Bardet O., Chondroyannis P., Cambécedès J., Garreta R., James D., Darmency H., **Guillemin J.P.**, Pointereau P., 2013. « MESSICOLES » : Conservation des plantes messicoles dans les parcelles cultivées : caractérisation des systèmes de cultures favorables, rôles fonctionnels, perception par la profession. Dans : *22^{ème} Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. AFPP, Dijon. 10-12 décembre. (poster)
- [AC22] Alrustrom B., **Guillemin J.P.**, Darmency H., 2016. Approches de la nuisibilité du bleuet en colza d'hiver. Dans : *23^{ème} Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. AFPP, Dijon. 6-8 décembre. (poster)
- [AC23] Cordeau S., Dessaint F., Denieul C., Bonin L., Vuillemin F., Deroueix F., Delattre M., Rodriguez A., **Guillemin J.P.**, Chauvel B., 2016. La nuisibilité directe des adventices en grandes cultures Quelles réponses nous apportent les essais désherbage ? Dans : *23^{ème} Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. AFPP, Dijon. 6-8 décembre. (communication orale)
- [AC24] Cordeau S., Dessaint F., Quinio M. De Waele M., Biju Duval L., Buthiot M., Cadet E., **Guillemin J.P.**, 2016. Analyse des effets direct et indirect des pratiques agricoles sur les adventices et la production de blé tendre d'hiver. Dans : *23^{ème} Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. AFPP, Dijon. 6-8 décembre. (communication orale)
- [AC25] Dessaint F., Bardet O., Cambécedès D., Darmency H., **Guillemin J.P.**, Huc S., Jammes D., Pointereau P., Rodriguez A., 2016. Quelles pratiques agricoles pour préserver les peuplements riches en espèces messicoles ? Dans : *23^{ème} Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. AFPP, Dijon. 6-8 décembre. (communication orale)
- [AC26] Triolet M., André O., Steinberg C., Cordeau S., **Guillemin J.P.**, 2016. Identification et caractérisation de candidats d'origine naturelle à action herbicide pour contrôler les adventices Dans : *23^{ème} Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. AFPP, Dijon. 6-8 décembre. (poster)

- **Communications à des congrès scientifiques sans actes**

- Congrès internationaux

- [CSI01] **Guillemin J.P.**, Duc G., Trouvelot A., Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S., **1990**. Mutations for nodulation which also affect the endomycorrhizal symbiosis in pea (*Pisum sativum* L.). *8th International Congress on Nitrogen Fixation*. Knoxville, Tennessee, USA, 20-26 mai. (communication orale)
- [CSI02] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., Gianinazzi-Pearson V., Duc G., Trouvelot A., Morandi D., **1990**. Plant genes determining VA endomycorrhizal infection. *8th NACOM, Innovation and Hierarchical Integration*. Jackson, Wyoming, USA, 5-8 septembre. (poster)
- [CSI03] Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S. **Guillemin J.P.**, Trouvelot A., Duc G., **1991**. Genetic and cellular analysis of resistance to vesicular-arbuscular (VA) mycorrhizal fungi in pea mutants. *5th International Symposium on the Molecular Genetics of Plant-Microbe Interactions*. Interlaken, Suisse, 9-14 septembre. (communication orale)
- [CSI04] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., **1991**. Fungicide interactions with VA fungi in *Ananas comosus* L. grown in a tropical environment. *3th European Symposium on Mycorrhizas, Mycorrhizas in Ecosystems – Structure and Function*. Sheffield, GB, 19-23 août. (poster)
- [CSI05] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., Trouvelot A., **1992**. Screening of VA endomycorrhizal fungi for establishment of micropropagated pineapple plants. *Joint Meeting between COST 87 and COST 8.10*. Dijon, 20-23 mai. (poster)
- [CSI06] Lovato P., **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., Trouvelot A., Gianinazzi-Pearson V., **1992**. Techniques for inoculation of horticultural plant with arbuscular endomycorrhizal fungi. *The International Symposium on Management of Mycorrhizas in Agriculture, Horticulture and Forestry*. Perth, Australie, 28 septembre-2 octobre. (poster)
- [CSI07] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., Gianinazzi-Pearson V., Marchal J., **1992**. Influence of arbuscular endomycorrhizas on the infection and development of nematodes (*Pratylenchus brachyurus*) in pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr) roots. *Joint Meeting between COST 87 and COST 8.10*. Granada, Espagne, 22-24 octobre. (poster)
- [CSI08] Lherminier J., Sagan M., Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S. **Guillemin J.P.**, Duc G., **1993**. Phenotype characterisation of partial resistance to mycorrhization and nodulation in a cv. Finale pea mutant. *9th NACOM, Conference of Mycorrhizae*. Guelph, Ontario, Canada, 8-12 août. (poster)
- [CSI09] Dumas-Gaudot E., Guillaume P., Tahiri-Alaoui A., Schellenbaum L., Gollote A., **Guillemin J.P.**, Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S., **1993**. Changes in gene expression during vesicular-arbuscular (VA) mycorrhiza symbiosis. *9th NACOM, Conference of Mycorrhizae*. Guelph, Ontario, Canada, 8-12 août. (poster)
- [CSI10] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., Gianinazzi-Pearson V., **1993**. Micropropagation of pineapple, endomycorrhization and plant growth. *Joint Meeting between COST 87 and COST 8.10*. Laukaa, Finlande, 16-19 septembre. (communication orale)
- [CSI11] Lovato P., **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., Trouvelot A., Gianinazzi-Pearson V., **1993**. Inoculation of horticultural plants with arbuscular endomycorrhizal fungi : some techniques towards sustainable plant production. *COST Meeting on the impact of Arbuscular Mycorrhizas on Sustainable Agriculture and Natural Ecosystems*. Einsiedeln, Suisse, 29 septembre-2 octobre. (communication orale)
- [CSI12] **Guillemin J.P.**, Lemoine M.C., Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S., **1994**. The influence of arbuscular and ericoid endomycorrhiza formation on levels of photosynthetic pigments in host-plants. . *4th European Symposium on Mycorrhizas, Mycorrhizas in Integrated Systems from Genes to Plant Development*. Granada, Espagne, 11-14 juillet. (poster)
- [CSI13] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., Gianinazzi-Pearson V., Marchal J., **1995**. Endomycorrhization of micropropagated pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr). *2nd Symposium International Ananas*. Trois Ilets, France. 20-24 février. (poster)
- [CSI14] Lu J.W., **Guillemin J.P.**, Zhang X., Sarrazin P., Ma C., Coquille J.C., **2000**. A study for measuring the sunlit areas of onions and weeds in the field by image processing. Dans : *Proceedings of International Conference on Engineering and Technological Sciences*. J. Song and M. Wang, Eds. New World Press, Beijing, Chine. 230-235. (poster)
- [CSI15] Vioix J.B., Douzals J.P., Truchetet F., Assemat L., Le Corre V., Dessaint F., **Guillemin J.P.**, **2001**. Development of a spatial method for weed detection and localization. *QCAV2001: Colloque*

- International sur le Contrôle Qualité par Vision Artificielle*, Le Creusot, France, 21-23 mai. Cépaduès-Editions, Toulouse. 399-402. (communication orale)
- [CSI16] Lu J.W., Gouton P., **Guillemin J.P.**, Ma C., Coquille J.C., **2001**. Utilization of segmentation of color images to distinguish onions and weeds in field. *QCAV2001: Colloque International sur le Contrôle Qualité par Vision Artificielle*, Le Creusot, France, 21-23 mai. Cépaduès-Editions, Toulouse. 557-562. (communication orale)
- [CSI17] Vioix J.B., Douzals J.P., Assemat L., Le Corre V., Dessaint F., **Guillemin J.P.**, **2001**. Development of a combined spatial and spectral method for weed detection and localization. *Third European Conference on Precision Agriculture*. ENSAM/INRA, Montpellier, France, 18-20 juin. (communication orale)
- [CSI18] Lu J.W., Gouton P., Coquille J.C., Ma C., **Guillemin J.P.**, **2001**. Using small region to distinguish onion from weeds in field. *Visualization, Imaging and Image Processing, IASTED International Conference*. IASRED, Marbella, Spain, 3-5 septembre. (poster)
- [CSI19] Granger S., **Guillemin J.P.**, **2004**. Determination of germination base temperature of weeds. *VIII ESA Congress: European Agriculture in a Global Context*. Copenhagen, Denmark, 11-15 juillet. KVL, 845-846. (communication orale)
- [CSI20] Gée C., Bonvarlet L., Magnin-Robert J.B., **Guillemin J.P.**, **2004**. Weed classification based on spectral properties. *7th International Conference on Precision Agriculture*. Minneapolis, Minnesota, USA, 25-28 juillet. (communication orale)
- [CSI21] Cointault F., Gée C., Guérin D., **Guillemin J.P.**, **2004**. Feasibility study of a wheatears counting vision system. *International Conference on Complex Systems Intelligence and Modern Technological Applications*. Cherbourg, France, 19-22 septembre. (communication orale)
- [CSI22] Mansouri A., Gée C., **Guillemin J.P.**, Marzani F.S., Gouton P., **2005**. Multispectral image acquisition and spectral reflectance reconstruction: application to plant detection. *7th International Conference on Quality Control by Artificial Vision*. Nagoya Japon, 18-20 mai. (poster)
- [CSI23] Bossu J., Gée C., **Guillemin J.P.**, Truchetet F., **2005**. Feasibility of a real-time weed detection system using spectral reflectance. *5th European Conference on Precision Agriculture (5ECPA)*, Uppsala, Suède, June 9-12. 123-130. (poster)
- [CSI24] Gée C., Douzals J.P., **Guillemin J.P.**, Truchetet F., **2005**. Weed discrimination from their spectral properties and from multi-spectral images. *EWRS-SSWM workshop*, Bygholm, Denmark, November 14-15 novembre. (communication orale)
- [CSI25] Bossu J., Gée C., **Guillemin J.P.**, Truchetet F., **2006**. Development of method based on Hough transform to detect crop row in agronomic image -*18th Annual Symposium Electronic Imaging Science and Technology San Jose* (Californie) USA, January 15-19. (communication orale)
- [CSI26] Chauvel B., **Guillemin J.P.**, Dessaint F., Délye C., **2006**. Regional study of herbicide resistance of *Alopecurus myosuroides* Huds. *23th German Conference on Weed Biology and Weed Control*. Stuttgart-Hohenheim, Allemagne, March 7-9. (communication orale)
- [CSI27] Martin-Laurent F., Rouard N., **Guillemin J.P.**, **2006**. Variability of atrazine-mineralization activity and of atrazine –mineralization genetic potential within an experimental field. *2nd FEMS Congress of European Microbiologists*, Madrid, Espagne, July 4-8. (poster)
- [CSI28] Gée C., **Guillemin J.P.**, **2006**. Internal leaf structure and spectral reflectance of weeds. *8th International Conference on Precision Agriculture*. Minneapolis, Minnesota, USA, July 23-27. CD-ROM. ASA-CSSA-SSSA (Eds.). (communication orale)
- [CSI29] Gée Ch., Berret L., Chardon C., Bossu J., **Guillemin J.P.**, Jones G., Truchetet F., **2008**. Feasibility study for a catadioptric bi-spectral imaging system. Dans : *20th Annual Symposium on Electronic Imaging Science and technology – "Image Processing: Machin Vision Applications"* - San Jose, CA, USA, 28 Jan-02 Fev. 2008. Vol.6813. (communication orale)
- [CSI30] Bretagnolle F., Chauvel B., Gauvrit C, Fumanal B, **Guillemin J.P.**, Laitung B, Dessaint F., **2008**. Some aspects of the biology and the ecology of *Ambrosia artemisiifolia* in France. *Europäisches Pollen symposium der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst*. Bad Lippspringe (Allemagne). 28-30 mars 2008. (communication orale)
- [CSI31] **Guillemin J.P.**, Reibel C., Granger S., Chauvel B., **2008**. Evaluation of base temperature of several weed species. *V International Weed Science Congress*. Vancouver, Canada, June 23-27, 2008. (communication orale)

- [CSI32] **Guillemin J.P.**, Reibel C., Chauvel B., **2008**. Effect of seed burying on seedling emergence of *Ambrosia artemisiifolia* L.. *First International Ragweed Conference*. Budapest, Hongrie. September 10-13, 2008. (communication orale)
- [CSI33] Bellanger S., **Guillemin J.P.** Darmency H., **2009**. *Centaurea cyanus* as an indicator of biodiversity. *3rd Workshop of the EWRS working group: Weeds and Biodiversity*. Lleida, March 12-13. (poster)
- [CSI34] Colbach N., Gardarin A., Granger S., **Guillemin J.P.**, Munier-Jolain N., **2009**. Using weed dynamics models for evaluating and developing integrated cropping systems. *Farming Systems Design 2009*. Monterey, Californie, USA. August 23-26, 2009. (communication orale)
- [CSI35] Bellanger S., **Guillemin J.P.**, Darmency H., **2010**. Mating system adaptation in populations of *Centaurea cyanus* L.. *4rd Workshop of the EWRS working group: Weeds and Biodiversity*. Dijon, February 28 - March 2.
- [CSI36] Bellanger S., Darmency H. **Guillemin J.P.**, **2012**. Biological causes of cornflower regression. . *VI International Weed Science Congress*. Hangzhou, Chine, June 17-22.
- [CSI37] Rodriguez A., Pointereau P., Bardet O., Chondroyannis P., Huc S., Cambécedès J., Garreta R., James D., Darmency H., **Guillemin J.P.**, Chardès M.C., **2013**. Segetal plant conservation in arable fields: functional role, farmers' perception and farming systems. *EWRS Congress*, Samsun, Turkey 24-27 June.
- [CSI38] **Guillemin J.P.**, Gauvrit C., Gasquez J., Chauvel B., **2013**. A database for the herbicide use in France. *EWRS Congress*, Samsun, Turkey 24-27 June.
- [CSI39] Reibel, C. Cordeau S., **Guillemin J.P.**, Chauvel B., **2014**. Drought affects weed emergence in cover crops of no-till systems. 13th ESA Congress, 25-29 August 2014, Debrecen, Hungary.
- [CSI40] Chemidlin Prevost Bouré N., Constancias F., Terrat S., Dequiedt S., Saby N., Horrigue W., Biju Duval L., **Guillemin J.P.**, Jolivet C., Arrouays D., Maron P.A., Ranjard L., **2014**. A spatial Upscaling Strategy to Assess Soil Microbial Community Assembly and the Impact of Land-Use. First Global Soil Biodiversity Conference, 2-5 décembre, Dijon, France. (communication orale)
- [CSI41] Alrustom B., **Guillemin J.P.**, Darmency H., **2015**. The adaptation of cornflower in different compartments of the agricultural landscape. 17th European Weed Research Society Symposium. "Weed management in changing environments", 23-26 June 2015, Montpellier, France.
- [CSI42] Dessaint F., Rodriguez A., Pointereau P., Bardet O., Huc S., Cambacedès J., Garreta R., James D.7, Darmency H., **Guillemin J.P.**, Chardès M.C., **2015**. How rare arable weeds are descriptors of low farming intensification? 17th European Weed Research Society Symposium. "Weed management in changing environments", 23-26 June 2015, Montpellier, France.
- [CSI43] Cordeau S., Lizon-au-cire D., Reibel C., Strbik F., Dugué F., Matejcek A., **Guillemin J.P.**, **2015**. Weed seeds ability to emerge on the soil surface. 17th European Weed Research Society Symposium. "Weed management in changing environments", 23-26 June 2015, Montpellier, France.
- [CSI44] Cordeau S., De Waele M., Dessaint F., Biju-Duval L., Buthiot M., Cadet E., **Guillemin J.P.**, **2015**. Analysis of relationships between farming practices, weed flora and crop production. "Weed management in changing environments", 23-26 June 2015, Montpellier, France.

• Congrès nationaux

- [CSN01] **Guillemin J.P.**, Trouvelot A., Duc G., Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S., **1990**. Obtention de mutants myc- chez le pois : analyse génétique et cellulaire. *Réunion du Groupe Mycorhize*. INRA, Montpellier, 18-19 janvier. (communication orale)
- [CSN02] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi S., **1990**. Rôle et utilisation des mycorhizes dans la production horticole. *L'ananas : réunion annuelle 1990*. CIRAD, Montpellier, 3-7 septembre. (communication orale)
- [CSN03] Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S., Dumas-Gaudot E., Tahiri-Alaoui A., **Guillemin J.P.**, Gollote A., **1991**. Caractérisation des interfaces plante/champignon endomycorhizogène lors d'interactions compatibles ou incompatibles. *Journées Parois*. Université Paul Sabatier, 19-20 décembre. (communication orale)
- [CSN04] Dumas-Gaudot E., Guillaume P., Tahiri-Alaoui A., Schellenbaum L., Gollote A., **Guillemin J.P.**, Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S., **1993**. Changes in gene expression during vesicular-arbuscular (VA) mycorrhiza symbiosis. *Ecole-chercheur, Biologie moléculaire des plantes, Interaction Plantes-Microorganismes*. INRA, Nancy, 4-11 septembre. (communication orale)
- [CSN05] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S., **1993**. Influence des endomycorhizes à

- arbuscules sur l'infection et le développement de nématodes (*Pratylenchus brachyurus* (Godfrey) Filip & Schur.-Steeck.) chez l'ananas (*Ananas comosus* (L.) Merr). *Société Française de Phytopathologie*, 3^{ème} Congrè National. Dijon, 6-10 décembre. (poster)
- [CSN06] **Guillemin J.P.**, Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S., **1993**. Action de *Phytophthora cinnamomi* Rands sur le développement des endomycorhizes à arbuscules et sur la croissance de l'ananas (*Ananas comosus* (L.) Merr). *Société Française de Phytopathologie*, 3^{ème} Congrè National. Dijon, 6-10 décembre. (poster)
- [CSN07] **Guillemin J.P.**, **1994**. Remarques sur le développement du système racinaire des plantes endomycorhizées. *Séminaire INRA-CMSE : Rhizosphère-Inoculation-Inoculums*. Dijon, 13 juin. (communication orale)
- [CSN08] Lu J.W., Gouton P., **Guillemin J.P.**, Ma C., Coquille J.C., **2001**. A method of using segmentation of colour images and shape factors with frontier rates to identify onion and weeds in field. GRESTITI'01 on SIGNAL and IMAGE process. Toulouse, France, 10-13 septembre. (communication orale)
- [CSN09] Lu J.W., **Guillemin J.P.**, Gouton P., Coquille J.C., Ma C., **2003**. Analyses d'images multispectrales pour séparer les oignons et les adventices. Ecole de printemps – Images Numériques Couleur, Laboratoire LE2I, Université de Bourgogne, 18-21 mars, Dijon, France. 162-168. (communication orale)
- [CSN10] **Guillemin J.P.**, Fumanal B., Denis A.C., Jannier M., Moreto M., Chauvel B., **2006**. Variabilité des semences chez *Ambrosia artemisiifolia* L.: Conséquences sur l'aptitude à la germination. Symposium "Ecologie des Communautés végétales" ECOVEG 2. IUT de l'université d'Avignon, 5-7 avril. (poster)
- [CSN11] **Guillemin J.P.**, Reibel C., Chauvel B., **2008**. Impact de l'enfouissement sur l'émergence des semences of *Ambrosia artemisiifolia* L. Colloque Européen 2008 sur l'Ambrosie. Aix les Bains. 21 novembre 2008. (poster)
- [CSN12] Bellanger S., **Guillemin J.P.**, Darmency H., **2010**. Adaptation du système de reproduction dans les populations de bleuet. *Ecologie 2010*, Montpellier, 2-4 septembre. (poster)
- [CSN13] Bellanger S., **Guillemin J.P.**, Darmency H., **2012**. Les causes biologiques de la régression du bleuet (*Centaurea cyanus* L.). Réveil du Dodo IV, Dijon, 2-4 mai (communication orale)
- [CSN14] **Guillemin J.P.**, Gasquez J., Gauvrit C., Chauvel B., **2012**. Historique des herbicides en France depuis la seconde guerre mondiale. 42° Congès du Groupe Français des Pesticides. ENSI, Poitier, 30 mai au 1 juin. (communication orale)
- [CSN15] Gaba S., Biju-Duval L., Strbik F., E. Gaujour, Bretagnolle F., Coffin A., Cordeau S., Dessaint F., Fried G., Gard B., Gardarin A., Gibot-Leclerc S., **Guillemin J.P.**, Matejicek A., Louvriot G., Perronne R., Reboud X., **2014**. WEED-DATA : base de données « traits » des plantes adventices des agroécosystèmes. 10^{ème} congrès francophone d'écologie des communautés végétales ECOVEG 10, Lyon, 9 au 11 avril (poster)
- [CSN16] Constancias F., Terrat S., Saby N., Horrigue W., Villerd J., **Guillemin J.P.**, Biju Duval L., Nowak V., Dequiedt S., Ranjard L., Chemidlin Prevost Bouré N., **2014**. Caractérisation de la distribution spatiale des communautés microbiennes du sol et de ses déterminants à l'échelle du paysage. 7èmes Journées françaises de l'Écologie du Paysage. 27-30 octobre. Dijon, France. (poster)
- [CSN17] Froger M., Cellier V, Fontaine L., **Guillemin J.P.**, Rodriguez A., Cordeau S., **2015**. Accompagner les réseaux DEPHY-FERME et DEPHY-EXPE dans la caractérisation de l'effet des systèmes de culture sur la flore adventice. Rencontre sur la gestion durable des adventices « Comment maîtriser les adventices dans de nouveaux contextes de production », Paris, 15 décembre (poster)
- [CSN18] Darmency H., **Guillemin J.P.**, **2015**. Quels enseignements à retenir de la régression des messicoles ? Rencontre sur la gestion durable des adventices « Comment maîtriser les adventices dans de nouveaux contextes de production », Paris, 15 décembre (poster)
- [CSN19] Cordeau S., Reibel C., Strbik F., Matejicek A., Dugué F., Lizon-Au-Ciré D., **Guillemin J.P.**, **2017**. Capacité des adventices à germer en surface dans diverses conditions. "Gestion des adventices dans un contexte de changement. Séminaire de restitution à mi-parcours du projet de recherche ANR CoSAC (Conception de Stratégies durables de gestion des Adventices dans un contexte de Changement : climat, pratiques agricoles, biodiversité)." Paris, France, 31 janvier-1er février 2017. p.11-16. (communication orale).
- [CSN20] **Guillemin J.P.**, Chauvel B., **2017**. Prévention et gestion de la résistance aux herbicides en grandes cultures. "Journées d'Échanges sur les Résistances aux produits de protection des plantes 2017". Bordeaux France, 7-8 mars 2017. (communication orale, résumé).

Synthèse des activités de recherche

Bilan de publication

- 41 publications dans des revues internationales à comité de lecture
- 1 publication dans une revue nationale à comité de lecture
- 1 chapitre d'ouvrage avec comité de lecture
- 5 chapitres d'ouvrage sans comité de lecture
- 11 articles de vulgarisation
- 1 ouvrage technique
- 26 communications orales ou poster avec des actes
- 64 communications orales ou poster sans actes

Publications liées à ma thèse : 9 publications dans revues à comité de lecture, 1 chapitre d'ouvrage avec comité de lecture, 2 chapitres d'ouvrage sans comité de lecture, 20 communications.

Publications liées à l'agriculture de précision : 3 publications dans revues à comité de lecture dont 1 liée à la thèse de Jun Wei Lu, 1 publication dans une revue nationale à comité de lecture, 3 communications avec actes, 15 communications.

Publications liées à la thèse Andrej Susek : 2 publications dans revues à comité de lecture.

Publications liées aux recherches sur les adventices : 27 publications dans revues à comité de lecture, 2 chapitres d'ouvrage sans comité de lecture, 9 articles de vulgarisation, 26 communications avec actes, 29 communications.

Encadrements scientifiques

- 3 co-encadrements de thèse (validés par le CS de l'Université de Bourgogne)
- 1 participation à l'encadrement d'une thèse
- 12 DEA/Master 2 et Mémoire Ingénieur
- 7 Projets de 3^e année d'AgroSup orientés « activité de recherche »
- 6 Master 1
- 3 Projets de 2^e année d'AgroSup orientés « activité de recherche »
- 7 "BTS/IUT"

Co-encadrement de thèse

2016 – en cours : Co-encadrement de la thèse de Marion Triolet

Titre de la thèse « *Identification et caractérisation de candidats d'origine naturelle à action herbicide pour contrôler les adventices* »

Co-encadrement : J.P. Guillemain, C. Steinberg (DR INRA) et O. André (De Sangosse)

Bourse CIFRE financée par l'ANRT et la société De Sangosse.

2008-2011 : Co-encadrement de la thèse de Solène Bellanger

Titre de la thèse « *Analyse des populations de bleuet - une mauvaise herbe en forte régression au cours des dernières décennies : Lien entre les statuts génétiques et démographiques, et mesure de sa valeur* »

indicateur de la biodiversité des zones agricoles. »

Co-encadrement : J.P. Guillemain et H. Darmency (DR INRA)

Co-financement : Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche (DGER) du ministère de l'Agriculture et de la Pêche et le Conseil Régional de Bourgogne (CRB)

Valorisation : 5 articles à comité de lecture ([AS24], [AS28], [AS29], [AS30], [AS34], [AS38]), 6 communications ([AC13], [CSI33], [CSI35], [CSI36], [CSN12], [CSN13])

2002 -2007 : Co-encadrement de la thèse de Andrej Susek

Titre de la thèse « *Analyse des ressources génétiques et optimisation des techniques de production chez l'hellébore* »

Co-encadrement : J.P. Guillemain et J. Caneill (PR AgroSup Dijon)

Co-financement : ministère des affaires étrangères dans le cadre des programmes d'actions intégrées (PAI) et ENESAD dans le cadre de financements proposés par le Conseil Scientifique pour l'appui à la politique doctorale

Valorisation : 2 articles à comité de lecture ([AC14], [AC20])

Participation à l'encadrement de thèse

2000-2003 : Thèse de Jun Wei Lu

Titre de la thèse « *Segmentation d'image couleur et application à la séparation des oignons et des adventices* »

Financement : Ministère chinois de la recherche

Valorisation : 1 article à comité de lecture ([AS11]), 5 communications ([CSI14], [CSI16], [CSI18], [CSN08], [CSN09])

Encadrement de stages de 3^{ème} cycle (9)

Avril 2017-Septembre 2017

Lucie Guinchard, Mémoire de fin d'études, AgroCampus Ouest, site Angers.

Titre : Recherche de microorganismes d'origine tellurique à action herbicide. Encadrement : J.P. Guillemain (50%) et C. Steinberg (DR Inra) (50%)

Février 2017-juillet 2017

Louis Massicard, Master 2 FAGE, « Fonctionnement et Gestion des écosystèmes », AgroParis Tech.

Titre : Analyse temporelle et spatiale de la flore adventice dans un paysage agricole. Encadrement : J.P. Guillemain (30%), F. Dessaint (IE Inra) (30%) et S. Petit (DR Inra) (40%)

Avril 2016-Septembre 2016

Lui-Ji Harada, Mémoire de fin d'études, AgroCampus Ouest, site Angers.

Titre : Bioherbicides fongiques : recherche de champignons telluriques à action pathogène sur les semences d'adventices. Encadrement : J.P. Guillemain (50%) et C. Steinberg (DR Inra) (50%)

Septembre 2015-février 2016

Maude Quinio, Mémoire de fin d'études, ISARA, Lyon.

Titre : Analyse des relations entre les pratiques agricoles, la flore adventice et la production agricole – Utilisation de la méthode PLS-PM. Encadrement : J.P. Guillemain (50%) et S. Cordeau (CR Inra) (50%)

Valorisation : 1 article à comité de lecture ([AS36])

Février 2015-juin 2015

Mélanie De Waele, Master 2 FAGE, « Fonctionnement et Gestion des écosystèmes », AgroParis Tech.

Titre : Analyse des relations entre pratiques agricoles, flore adventice et production. Encadrement : J.P. Guillemain (50%) et S. Cordeau (CR Inra) (50%)

Valorisation : 1 communication ([CSI44])

Février 2013-juin 2013

Dewi Glau, Master 2 STVE, spécialité « de l'Agronomie à l'Agroécologie », AgroParis Tech.

Titre : Analyse en réseau de la co-occurrence de la diversité végétale et microbienne à l'échelle d'une mosaïque paysagère. Encadrement : J.P. Guillemain (50%) et N. Chemidlin (MC AgroSup) (50%)

Valorisation : 2 communications ([CSI40], [CSN16])

Février 2011-juillet 2011

Solène Touzeau, Master 2 Bop, spécialité végétal, Université de Bourgogne

Titre : Conséquence de la consanguinité sur la valeur phénotypique du bleuet (*Centaurea cyanus* L.).

Encadrement : J.P. Guillemain (25%), Solène Bellanger (doctorante) (50%) et H. Darmency (DR Inra) (25%)

Valorisation : 1 article à comité de lecture ([AS30])

Janvier 2011-juin 2011

Célice Augrain, Mémoire de fin d'études d'Ingénieur de l'ESA Angers

Titre : Evaluation multicritère de systèmes de culture contrastés. Encadrement : J.P. Guillemain (50%) et N. Munier-Jolain (IR Inra) (50%)

Mars 2010-Août 2010

Delphine Ramillon, Mémoire de fin d'études d'Ingénieur d'AgroSup Dijon

Titre : Etude de la répartition de la flore adventice dans un paysage agricole. Encadrement : J.P. Guillemain (50%) et S. Petit (DR Inra) (50%)

Mars 2004-Décembre 2004

D. Guerin, Mémoire de fin d'études d'Ingénieur ESIEA (Ecole Supérieure d'Informatique, Electronique et Automatismes), Université de Laval

Titre : Etude de faisabilité d'un système de comptage d'épis de blé par vision numérique. Encadrement : J.P. Guillemain (10%) et F. Cointault (90 %) (MC AgroSup)

Valorisation : 2 articles à comité de lecture ([AS17], [PN1])

Mars 2000-juillet 2000

J.B. Vioix, DEA Instrumentation et Informatique de l'image, Université de Bourgogne

Titre : Détection d'adventices par analyse d'images aériennes. Encadrement : J.P. Guillemain (50%) et J.P. Douzals (50 %) (MC ENESAD)

Valorisation : 2 communications ([AC10], [CSI15])

Mars 1997-novembre 1997

E.Y. Samaké, Mémoire de fin d'études d'Ingénieur de l'Institut Polytechnique rural de Katibougou (Mali) (collaboration avec l'ENESAD).

Titre : Comparaison technico-économique de modes de production biologique et conventionnelle de l'oignon. Encadrement : J.P. Guillemain (50%) et J.M. Thomas (50 %) (PR AgroSup)

Valorisation : 2 communications ([AC01], ([AC02])

Encadrement de projets de 3^{ème} année AgroSup Dijon (7)

2013-2014

S. Chiodini, L. Lançon, A. Relachon et L. Savian

Titre du projet : Analyse des successions culturales de la petite région agricole de Fenay et validation d'un système de référence pour le réseau PIC-Adventices. Encadrement : J.P. Guillemain (100%)

Valorisation : 1 article à comité de lecture ([AS27]), 1 article de vulgarisation ([AV06])

2008-2009

S. Dubourg, S. Perret et K. Talles

Titre du projet : Evaluation agro-environnementale de la zone « atelier » de Fenay. Encadrement : J.P. Guillemain (100%)

Valorisation : 1 communication ([AC14])

2004-2005

S. Briffon, F. Pontonnier et E. Tourton

Titre du projet : Relation entre la structure interne de feuilles d'adventices et leur réflectance dans le proche infrarouge. Encadrement : J.P. Guillemain (50%) et C. Gée (50%) (PR AgroSup)

Valorisation : 1 communication ([CSI28])

2004-2005

Y. Flodrops, K. Liare et E. Manet

Titre du projet : Intérêts agronomiques d'un système de comptage d'épis de blé par vision numérique à un stade précoce de la culture. Encadrement : J.P. Guillemain (20%) et F. Cointault (80%) (MC AgroSup)

Valorisation : 1 communication ([CSI21])

2003-2004

J. Cernois et A. Pillier

Titre du projet : Analyse spectrale et statistique pour la reconnaissance des adventices. Encadrement : J.P. Guillemain (50%) et C. Gée (50%) (PR AgroSup)

Valorisation : 2 communications ([AC12], ([CSI24])

2003-2004

A. De Fontanges, S. Ducrocq et J. Mussini

Titre du projet : Etude de l'effet de la température sur la germination et la croissance de mauvaises herbes inféodées au maïs. Encadrement : J.P. Guillemain (50%) et S. Granger (50%) (MC AgroSup)

Valorisation : 2 articles à comité de lecture ([AS19], ([AS25]), 3 communications ([AC06], ([CSI19], [CSN15])

2002-2003

L. Bonvarlet et J.B. Magnion-Robert

Titre du projet : Méthode statistique de classification d'adventices à partir de leurs spectres de réflectance. Encadrement : J.P. Guillemain (50%) et C. Gée (50%) (PR AgroSup)

Valorisation : 2 communications ([AC09], ([CSI20])

Encadrement d'activités de 2^{ème} cycle

7 Master 1

3 Projets de 2^{ème} année AgroSup Dijon (3)

Participation à des comités de thèse

2017- en cours : Thèse Séverin Yvoz

Titre de la thèse « *Analyse multi-échelles de compromis entre services écosystémiques fournis par la flore adventice* ».

2011-2014 : Thèse de Florentin Constancias

Titre de la thèse « *Lien diversité microbienne – fonctionnement biologique du sol à différentes échelles spatiales : de la parcelle au paysage agricole* »

Valorisation : 3 articles à comité de lecture ([AS26], ([AS32], ([AS33]), 2 communications ([CSI40], [CSN16])

2005-2008 : Thèse d'Antoine Gardarin

Titre de la thèse « *Modélisation des effets des systèmes de culture sur la démographie des adventices : cas de la dynamique de la banque de semences et de la levée* »

Valorisation : 2 articles à comité de lecture ([AS19], [AS25]), 1 communication ([CSN15])

2004-2007 : Thèse de Najoi El Azhari:

Titre de la thèse « Estimation du potentiel génétique hydroxylant d'un sol par PCR quantitative : un nouvel outil d'évaluation et de prédiction de la pollution d'un sol par des micropolluants organiques »

2000-2002 : Thèse de Jean-Baptiste Vioix

Titre de la thèse « *Identification et spatialisation des infestations d'adventices dans les cultures par analyses spatiale et spectrale d'images multicomposantes* »

Valorisation : 1 article à comité de lecture ([AS12]), 2 communications ([AC10], [AC12])

Collaborations scientifiques

- Groupe « Equilibre entre populations fongiques et qualité phytosanitaires des sols » (Foxy), Pôle IPM de l'UMR Agroécologie, Dijon

- Equipe « Distribution spatiale, dynamique et traduction fonctionnelle de la biodiversité des communautés microbiennes telluriques » (BIOCOM), pôle BIOmE de l'UMR Agroécologie, Dijon

- Equipe « Agriculture de précision », pôle GestAd de l'UMR Agroécologie, Dijon

- Participation au RMT Florad (flore adventice des grandes cultures)

- Instituts techniques : Terres Inovia, ACTA, Arvalis Institut du Végétal, In Vivo...

- Mise en place de collaboration avec des sociétés privées du domaine de la phytoprotection : De Sangosse, Bayer, ...

- Participation au réseau européen Endure

- Université Fédérale Santa Catarina de Florianopolis, Brésil

Une coopération de recherche se met en place avec l'un des enseignants de l'Université. En effet il souhaiterait réaliser un séjour post doctoral en France sur le thème de la présence d'un mulch ou de couverture végétale sur la germination et la levée des mauvaises herbes.

- Université de Maribor, Slovénie

Dans le cadre des échanges ERASMUS, une coopération entre l'ENESAD et la faculté agronomique de l'Université de Maribor (Slovénie) a été mise en place. C'est dans ce contexte, qu'un enseignant-chercheur slovène, Andrej Susek, a effectué sa thèse en co-tutelle entre les universités de Bourgogne et de Maribor.

Reconnaissance scientifique

Jury de thèse

En 2010 : Examineur dans le jury de thèse de Etienne Gaujour (Evaluation des sources d'espèces et des déterminants de la diversité des parcelles agricoles, thèse Université Nancy).

Relecteur (1 à 2 / an) : "Mycorrhiza", "Fruits", "Weed Research", "Weed Biology and Management",

"Scientia Horticulturae", "Agriculture, Ecosystems and Environment", "EcoScience", "Crop Protection".

Organisation de congrès

Participation à l'organisation du congrès IFOAM en 1995.

Participation à l'organisation au colloque EWRS Biodiversity de 2011.

Participation à l'organisation des Journées d'Echanges sur les Résistances aux produits de protection des plantes (JER) en 2015.

Traduction d'ouvrage scientifique

En 2007, traduction française de deux chapitres ("Classification" et "Champignons") de l'ouvrage « Biologie Végétale. Structure, fonctionnement, écologie et biotechnologies » de Murray Nabors.

Responsabilité et fonctions au service de l'UMR BGA

- Membre élu au Conseil d'Unité de l'UMR Biologie et Gestion des Adventices de 2006 à 2008.

- Co-animateur de l'équipe « Communautés Adventices en interaction dans les paysages agricoles » dans le pôle EcoDur de l'UMR Agroécologie de 2012 à 2015.

Synthèse des activités d'expertise et de développement

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

Depuis janvier 2016, je participe en tant qu'expert en agronomie et résistances des adventices aux herbicides aux travaux du groupe de travail "Phytopharmacovigilance" de l'Anses créé dans le cadre de la mise en place de la Loi d'Avenir pour l'agriculture du 13 octobre 2014.

Les travaux consistent à contribuer à la réalisation de fiches de données de surveillance sur les substances actives, à participer à la mise en place ou au choix des réseaux de surveillance des produits phytopharmaceutiques, à sélectionner les demandes de financement des études complémentaires aux réseaux de surveillance et à étudier les signalements d'effets indésirables des produits phytopharmaceutiques reçus par l'Anses.

Dans ce groupe de travail, j'ai été nommé, en juillet 2016, expert-rapporteur pour le traitement d'un dossier dont l'objet était le signalement d'une substance active non autorisée sur pomme et cresson dans le cadre d'une saisine déposée par la DGAL.

J'ai été également nommé, en juillet 2017, expert-rapporteur dans le cadre de la saisine « Risque et bénéfices attendus de l'utilisation des variétés tolérantes aux herbicides (VTH) non-transgéniques ».

Expertise phytosanitaire : Certiphyto (certificat individuel pour les produits phytopharmaceutiques)

A la demande de la Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche (DGER) du ministère en charge de l'Agriculture, j'ai été nommé membre du Groupe experts QCM Certiphyto de 2013 à 2016 en tant que représentant de l'enseignement supérieur agricole.

J'ai réalisé deux types de missions au sein de ce groupe de travail : relire et valider les questions du QCM pour obtenir le Certiphyto (3 jours/an), et animer et participer à des ateliers de création de questions (2 jours/an).

La DGER m'a été également demandé d'organiser et animer un groupe d'experts sur la faisabilité de questions QCM « techniques alternatives » dans le cadre du QCM Certiphyto en septembre 2015. Ce groupe s'est réuni une journée et le fruit du groupe de travail a donné lieu à un rapport envoyé à la DGER.

Expertise agronomique

En 1995 et 1996, j'ai réalisé des expertises agronomiques à la demande de Groupama dans le cadre de la mise en place d'assurance « accidents climatiques ».

Projet CAractérisation **SIM**plifiée des **press**lons **biotiques** et des **Régulations biologiques** (Projet CASIMIR)

Dans le cadre de ce projet, j'ai contribué entre 2012 et 2015 au développement de protocoles de suivi de la flore adventice dans différentes productions (Grandes Cultures, Vigne, Arboriculture, Maraîchage).

Ce projet a été financé dans le cadre des propositions de recherche « Pour et Sur le Plan Ecophyto 2018 ».

Projet Infloweb (site internet d'une de base de données pour connaître et gérer les adventices) ([AC20])

Je me suis fortement impliqué dans l'apport des données biologiques et écologiques des adventices qui alimentent la base internet.

Ce projet réalisé dans le cadre du RMT Florad a été financé entre 2011 et 2013 par le CASDAR.

Projet Sapin de Noël

J'ai été sollicité par le parc régional du Morvan pour définir et évaluer des critères définissant un arbre remarquable pour le Sapin de Noël du Morvan. Ce projet a donné lieu à deux années (2008 et 2009) de mesure et à la rédaction d'un guide à destination des producteurs de sapin de Noël intitulé « Définition et évaluation de critères décrivant un arbre remarquable pour le sapin de Noël du Morvan ».

Projet Truffe de Bourgogne

J'ai été sollicité par le syndicat producteur de truffes de Bourgogne (1995) afin de réaliser une exposition sur la Truffe de Bourgogne afin de mieux faire connaître cette production. Avec un groupe d'étudiants, une exposition de 12 panneaux a été réalisée.

Synthèse des activités d'enseignement et de formation

Je réalise la plus grande partie de mon enseignement au sein de la spécialité Agronomie d'AgroSup Dijon dans le cursus Ingénieur en formation initiale (IFI). Cette formation est composée de deux séquences d'enseignement :

- Une formation de base sur les deux premières années (IFI 1[°]A et 2[°]A) pour l'acquisition des connaissances de base de l'ingénieur et la mise en œuvre pratique de ces acquis (stages, projet, ...).
- La seconde séquence correspondant à une année de spécialisation (dominantes (IFI 3[°]A)) composée d'un enseignement à AgroSup Dijon et d'un stage de fin d'études.

L'autre partie de mon enseignement est réalisée dans le cursus Ingénieur en formation continue (IFC-IAE), et des formations co-habilitées ou conventionnées avec l'université de Bourgogne-Franche-Comté (Master Bop (Biologie des organismes et des populations) devenu BEE (Biodiversité, Ecologie et Evolution), Master ERE (Espace Rural et Environnement) devenu SEME (Sol, Eau, Milieux, Environnement), master B2iPME (Biologie intégrative des interactions Plantes, Microorganismes, Environnement), master GETIA

(Gestion des Entreprises et Technologies Innovantes pour l'Agroéquipement)).

Lors de mes premières années d'enseignement à l'ENESAD (devenu AgroSup Dijon depuis mars 2009), j'intervenais dans le cursus ingénieur en formation initiale essentiellement en travaux dirigés et pratiques d'Agronomie. Depuis plusieurs années, cette partie d'enseignement s'est fortement réduite avec une implication croissante dans l'enseignement théorique et pratique recouvrant les thèmes des relations biotiques dans les agrosystèmes et de la protection des végétaux en production végétale. Les enseignements liés à la connaissance et à la gestion des adventices sont réalisés par différents collègues également rattachés pour leur activité de recherche à l'UMR Agroécologie et moi-même. L'évolution de mon enseignement s'est faite également par des interventions accrues dans l'encadrement des projets et des stages. Pour les deux dernières éditions du COLUMA (Conférences de lutte contre les mauvaises herbes) organisées à Dijon en 2013 et 2016, des étudiants de la dominante Agronomie-Environnement (3^{ème} année du cursus ingénieur) ont participé activement aux présentations et ont valorisé leur présence par des articles dans la revue Phytoma ([AV07], [AV08], [AV09]).

J'interviens ou suis intervenu également régulièrement dans d'autres formations de l'université de Bourgogne telles la licence Bop, le Master Plantes, Productions, Biotechnologies, et dans d'autres établissements (Arts et Métiers de Cluny, Institut Polytechnique Lasalle de Beauvais, l'Université d'Angers (Master Biologie Végétale), l'Université de Clermont-Ferrand (Master Biologie Végétale)).

Le tableau ci-dessous précise mes enseignements pour l'année 2017-2018, il est globalement représentatif de mes activités d'enseignement depuis plusieurs années (I-FI : ingénieur en formation initiale, I-FC-IAE : ingénieur en formation continue).

| Cursus | Enseignements | Heures ETD |
|-----------------------|---|------------|
| I-FI 1 ^o A | Cours Nutrition des Plantes | 110 |
| | Cours Protection des végétaux | |
| | TD et TP d'Agronomie | |
| | Encadrement de stages | |
| | Projet phase A (Recherche Documentaire) | |
| I-FI 2 ^o A | Encadrement d'un projet phase B | 25 |
| | Encadrement de stages | |
| I-FI 3 ^o A | Cours dans module « Diagnostic et conception d'ITK et de système de culture pour la gestion des bioagresseurs » | 49 |
| | Encadrement d'un projet phase C | |
| | Encadrement de mémoires de fin d'études | |
| | Présidence de jury de mémoires de fin d'études | |
| I-FC-IAE | Cours Protection des végétaux et Plan Ecophyto | 19 |
| | Encadrement dans le module « Diversité des sols et Système de culture » | |
| | Formation à la recherche documentaire | |
| | Correction de rapports bibliographiques | |
| Master Bop/BEE | Participation à des jurys | 3 |
| Master B2iPME | Cours dans module « Agroécologie » | 20 |
| | TD dans module « Agroécologie » | |
| Master ERE/SEME | Cours Protection des végétaux | 4 |
| Master GETIA | Cours Protection des végétaux et TP Pulvérisation | 5 |

235 h ETD hors responsabilité

Pour l'année scolaire 2017-18, la répartition de mes activités d'enseignement (hors responsabilités) est la suivante :

- Répartition (hors responsabilité) par cursus :
IFI : 79%, IFC-IAE : 8% et Master : 13%
- Répartition (hors responsabilités) par type d'enseignement :
Cours : 23%, TD-TP : 37% et encadrement : 40%

Responsabilités actuelles d'enseignement :

- Responsable de modules du programme d'Agronomie (IFI 1°A et IFI 3°A) depuis 2004, de la recherche documentaire du cursus Ingénieur en formation continue (I-FC) depuis 2010.
- Responsable AgroSup Dijon du Master Bop devenu BEE (Biologie, Ecologie, Evolution), formation co-habituée avec l'université de Bourgogne depuis 2007. Je partage depuis l'année 2015 cette responsabilité avec une collègue, S. Granger.

Mes responsabilités liées à l'enseignement représentent environ 10 h eq.TD/an.

Responsabilités antérieures d'enseignement :

- Responsable de l'Unité Pédagogique « Agronomie » à AgroSup Dijon (15 enseignants-chercheurs) de 2010 à 2016.
- Responsable de l'activité projet phase A (recherche documentaire) du cursus Ingénieur en formation initiale (I-FI) de 1992 à 2017
- Correspondant pour le département 2A2E des enseignants agronomiques pour le Master MaTEA (Master Management Technique et Économique des Agroéquipements, master article 15) auprès des collègues d'Agroéquipement d'AgroSup Dijon de 2010 à 2015.
- Membre de la commission de suivi personnalisé à l'ENESAD jusqu'au 2008. Cette commission réalisait le suivi personnalisé des résultats des étudiants.
- Membre de l'équipe pédagogique d'établissement à l'ENESAD de 2006 à 2008. Ce groupe de travail gérait le fonctionnement de la formation.
- Correspondant ERASMUS du département Agronomie-Environnement de 1994 à 2002.
- De 1992 à 2002 : responsable des parcelles pédagogiques (un ensemble de 50 microparcelles) de l'ENESAD.

Activité de formation auprès de professionnels

Je réalise ponctuellement depuis 2010 des formations auprès de professionnels dans mes domaines de compétence tels que l'écophysiologie et l'élaboration du rendement du blé et du colza (société AGRIVA), la gestion des adventices (Groupe Soufflet), la gestion des adventices résistantes aux herbicides (réunions R4P (Réseau de Réflexion et de Recherches sur les Résistances aux Pesticides), ...

Synthèse des responsabilités et services rendus

Responsabilité et fonctions au service de l'établissement

- Depuis 2016 : Membre élu au Conseil Scientifique d'AgroSup Dijon
- Depuis 2016 : Membre nommé du Conseil Scientifique du Parc National Forêt Champagne-Bourgogne
- Depuis 2011 : Représentant d'AgroSup Dijon à l'AFPP (Association Française de la Protection des Plantes)
- De 2010 à 2016 : Responsable de l'Unité d'enseignement « Agronomie » (organisation de l'enseignement réalisés par 15 Enseignants-Chercheurs et Ingénieurs)
- Depuis 2010 : Membre élu de la commission des enseignants (CE) d'AgroSup Dijon.
- Depuis 2009 : Représentant d'AgroSup Dijon (enseignement supérieur) au Comité Régional de Suivi et d'Orientation (CROS) du plan Ecophyto
- Depuis 2008 : Représentant d'AgroSup Dijon (*enseignement supérieur*) et de l'UMR Agroécologie (*recherche*) dans le Réseau Mixte Technologique "Gestion de la flore adventice en grandes cultures" (RMT Florad)
- De 1998 à 2009 : Membre élu de la commission des enseignants-chercheurs (CEC) de l'ENESAD
- De 2005 à 2007 : Membre nommé par le département "Agronomie et Environnement" dans le Groupe "Formations Ingénieur" dans le cadre de la fusion ENESAD/ENSBANA
- De 2004 à 2007 : Membre du groupe de travail responsable du suivi de la construction du nouveau bâtiment "Combe Berthaux" à l'ENESAD devenu AgroSup Dijon
- De 2003 à 2014 : Membre de la Commission Médiadoc (centre de documentation de l'ENESAD)
- De 2003 à 2006 : Membre nommé par l'ENESAD du groupe de travail de la filière d'emplois (GEFE) de l'Observatoire des Missions et des Métiers (OMM) relative à la filière de la protection des végétaux mis en place par le ministre de l'Agriculture et de la Pêche

Responsabilité et fonctions au service du département 2A2E

- Référent de cinq techniciens rattachés au D2A2E (gestion de l'organisation de leur emploi du temps et leur évolution carrière) de 2009 à 2016

Responsabilité et fonctions au niveau national

- De 2002 à 2013 : Membre titulaire élu à la Commission National des Enseignants-Chercheurs du ministère en charge de l'Agriculture n°5 (CNECA n°5)

Participations à des jurys

- Depuis 2006 : participation à sept jurys de recrutement d'un maître de conférences du ministère en charge de l'Agriculture (AgroParisTech, SupAgro Montpellier, VetAgro Clermont et AgroSup Dijon) et membre suppléant à un jury de recrutement d'un maître de conférences à l'INH (2007).
- 2010 : Membre d'un jury de recrutement de technicien à l'INRA
- Participation régulière (tous les 2 ans) à des jurys de recrutement d'Ingénieurs en formation initiale (IFI) (épreuve d'entretien se déroulant à Bordeaux Sciences Agro).
- Participation à des jurys de recrutement des Ingénieurs DPE (Diplômé Par l'Etat).

Les travaux de recherche et le projet de recherche

I. Contexte général des travaux de recherche

I.1 - Préambule

Après une formation universitaire à Besançon et Dijon centrée sur les domaines de la biologie et de la physiologie végétale, mon activité scientifique s'est déroulée selon deux principales phases.

- La première phase a consisté, au cours de mon DEA, de ma thèse et de mes premières années sous contrat à l'ENITA devenue ENESAD, à réaliser des travaux sur les endomycorhizes, champignons symbiotiques présents chez la majorité des espèces végétales, au sein et en partenariat avec le laboratoire de *Phytoparasitologie* de l'Inra de Dijon. Durant ma thèse, j'ai développé un sujet lié à l'axe de recherche du laboratoire intitulé "Rôle des endomycorhizes dans les agro-écosystèmes : application à la production de diverses plantes vivrières et d'ornement". A l'échelle des systèmes de culture, la technique qui consiste à inoculer des plantes avec des champignons endomycorhizogènes est très peu répandue. Cette technique est particulièrement intéressante dans des situations où l'association symbiotique est absente à l'état "naturel". Les travaux réalisés en collaboration avec le centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) et la société VITROPIC S.A., ont consisté à intégrer les endomycorhizes dans le cycle de production d'ananas micropropagés. L'objectif était de contrôler et réduire la phase d'acclimatation (phase entre la sortie des conditions axéniques et la transplantation au champ) grâce à l'inoculation par des champignons endomycorhizogènes (annexe 1) ([ACL01], [ACL02]). L'endomycorhization des *vitroplants* à la sortie des conditions axéniques a permis d'améliorer la nutrition minérale et la croissance des plants d'ananas ([ACL07], [ACL08]), d'augmenter leur tolérance à des bioagresseurs telluriques (nématode et oomycètes) ([ACL05], [ACL06]), et de montrer que les endomycorhizes peuvent être compatibles avec l'usage de certains fongicides ([ACL04]). Cette technique d'inoculation peut donc être intégrée dans un schéma de production intégrée ([ACL03], [ACL09]).

- Depuis mon recrutement à l'ENESAD en 1997, mes activités de recherche sont ensuite orientées vers l'étude des adventices. Dans ce document, je ne présenterai que les travaux de recherches concernant les adventices.

En intégrant l'équipe de recherche "*Composantes biologiques de la fertilité*" de l'ENESAD, j'ai mis en place des expérimentations pour étudier la concurrence pour la ressource "lumière" entre les plantes cultivées et les adventices. Ces travaux s'inscrivaient dans une phase analytique devant mener à la caractérisation de variables pertinentes pour la conception de modèles de compétition. Sur cette thématique, j'ai récemment contribué à des travaux qui avaient pour objectif d'évaluer la nuisibilité des adventices.

A la création de l'UMR "*Biologie et Gestion des Adventices*" (BGA) (ENESAD, Inra et Université de Bourgogne), mes activités se sont réorientées vers l'acquisition de données biologiques (et physiques) sur les adventices (majoritairement pendant la phase germination/levée) et leur évolution sous l'effet des systèmes de culture. Je me suis également impliqué dans des travaux sur la résistance des adventices aux

herbicides avec pour objectif de concevoir des systèmes de culture permettant de maîtriser de telles adventices.

L'objectif final de l'ensemble de ces travaux est de produire des informations mobilisables afin de concevoir des systèmes de culture doublement performant (productif et à faible impact environnemental).. Ces travaux de recherche sont maintenant réalisés au sein de l'UMR Agroécologie (AgroSup Dijon, Inra et Université de Bourgogne-Franche-Comté) dans le pôle GestAd (Gestion durable des Adventices).

En parallèle j'ai développé des travaux avec des collègues d'Agroéquipement, maintenant intégrés dans l'UMR *Agroécologie*, sur la détection des adventices dans les parcelles cultivées afin de localiser les interventions de désherbage (grâce à des caractéristiques physiques).

Mes activités de recherche se sont en grande partie déroulées, en collaboration avec des chercheurs de mon unité et des spécialistes des adventices des instituts techniques, et de manière ponctuelle avec des chercheurs d'autres instituts (CNRS Chizé, ...). Ces collaborations ont été mises en place dans le cadre de partage de compétences, en particulier en génétique des populations (résistances aux herbicides), en écologie végétale et microbienne, en modélisation, en physique appliquée... Quelles que soient les thématiques abordées, le sujet d'étude est toujours resté centré sur les adventices dans les systèmes cultivés.

La réduction préconisée de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques dans le cadre du plan Ecophyto (Anonymous, 2008) et plus récemment l'émergence de l'agroécologie en France et en Europe (Wezel *et al.*, 2009; Stassart *et al.*, 2012) ont évidemment orienté le développement de mes travaux.

I.2 - Des éléments de contexte sur les adventices

Le terme adventice (mauvaise herbe) désigne l'ensemble des plantes, non souhaitées, présentes dans des zones utilisées pour les activités agricoles. Ce sont des espèces aptes à survivre dans des agrosystèmes donc adaptées aux perturbations du milieu et capables de supporter la compétition exercée par les cultures. Face aux degrés de perturbation rencontrés, ce sont donc essentiellement des espèces dites thérophytes et géophytes selon la classification de Raunkjær (1934) qui ont subsisté dans les zones cultivées. Les milieux cultivés sont donc caractérisés par une part importante d'espèces annuelles monocarpiques, à cycle de développement généralement court. Le stock de semences joue donc un rôle fondamental dans la dynamique et le maintien de ces espèces dans les milieux cultivés.

J'utiliserai la définition énoncée par Augustin Pyrame de Candolle en 1832 « *Toutes les herbes qui naissent d'elles-mêmes dans les terrains cultivés pour d'autres, sont réputées mauvaises herbes, quelle que puisse être d'ailleurs leur utilité. Il en est ainsi des herbes précieuses dans certains cas qui sont flétries par ce nom injurieux lorsqu'elles naissent hors de place. Cette dénomination est fondée sur ce que toutes ont au moins cet inconvénient de prendre sur le terrain une place qui pourrait être mieux occupée, et de s'emparer d'une partie des sucs destinés à des végétaux plus utiles...* » (de Candolle, 1832).

De manière générale, les adventices sont perçues comme une gêne (Blatchley, 1912), d'où le nom « mauvaise herbe », pour le développement des plantes cultivées et la réalisation de certaines opérations culturales. Par leur présence et leur abondance, elles peuvent constituer un risque de pertes de revenus pour l'agriculteur en réduisant la quantité et la qualité de la récolte ou en ralentissant son travail (Zimdahl, 2007). Le terme de nuisibilité est utilisé pour désigner l'effet des adventices sur les cultures (Caussanel, 1989). Il existe plusieurs types de nuisibilité :

- La nuisibilité primaire est celle qui se produit au cours de la culture ; elle peut être directe ou indirecte.
 - o La *nuisibilité directe* est la conséquence de l'impact de l'émission de substances inhibitrices sur la plante cultivée dans l'environnement de la parcelle (allélopathie) ou plus généralement de la compétition pour les ressources (lumière, eau et éléments minéraux) exercée par les plantes adventices sur la culture. Dans le cas des adventices, la compétition se définit comme une relation négative entre deux individus d'espèces différentes (compétition interspécifique) qui doivent se partager des mêmes ressources limitées. Ainsi, le niveau de compétition dépend du niveau des ressources disponibles, de la durée de co-occurrence des individus, et de la densité et de l'aptitude des individus à prélever ces ressources. Or les ressources et la densité des espèces adventices sont fortement variables dans le temps et l'espace, et dépendent très largement des conditions pédo-climatiques et des pratiques des agriculteurs.
 - o La nuisibilité indirecte est un effet négatif de la présence des adventices dans la parcelle comme par exemple le fait qu'une adventice puisse impacter l'état sanitaire de la culture en étant vecteur d'un agent pathogène d'une espèce cultivée (par ex. ergot du seigle propagé par des graminées adventices), puisse altérer la qualité de la récolte (par ex. présence de semences toxiques d'espèces adventice dans une récolte), puisse augmenter le temps de travail sur une parcelle (activité de désherbage), puisse gêner la récolte (par ex. présence de gaillet gratteron)...
- La nuisibilité secondaire correspond à l'apport de semences de plantes adventices ce qui permet d'alimenter et donc de reconstituer le stock semencier de la parcelle. Ces nouvelles semences seront potentiellement à l'origine d'émergence, et donc d'adventices dans les futures cultures. Le niveau d'alimentation du stock semencier a donc une influence sur la nuisibilité primaire directe les années suivantes.

La nuisibilité semble une évidence toutefois sa quantification n'est que très rarement réalisée (Silvy, 1995 ; Oerke et Dehne, 1997 ; Oerke, 2006) et, souvent, à travers d'estimation à grande échelle telles que zones de production ou pays.

Comme évoqué dans la définition proposée par Augustin Pyrame de Candolle (« ... *quelle que puisse être d'ailleurs leur utilité ...* ») et par plusieurs auteurs (Aymonin, 1962 ; Altieri et Whitcomb, 1979 ; Jauzein, 1995 ; Hillocks, 1998 ; ...), certaines espèces adventices sont en mesure de produire des bénéfices. Cet aspect a été repris dans les synthèses réalisées pour le Millenium Assessment (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) en termes de services écosystémiques. Différents types de service sont attribués aux adventices ; elles permettraient de protéger les nappes phréatiques contre l'entraînement de diverses molécules, d'accueillir des auxiliaires des cultures (Landis *et al.*, 2000) et serviraient de ressources alimentaires par la fourniture de nectar et pollen (insectes pollinisateurs) et des semences pour des invertébrés (insectes) et vertébrés (oiseaux, micromammifères) (Marshall *et al.*, 2003 ; Holland *et al.*, 2006 ; Storkey, 2006). Par exemple, dans certaines régions françaises entre les périodes de floraison du colza et du tournesol, le coquelicot peut représenter une part importante du bol pollinique de l'abeille domestique. De plus la présence d'espèces adventices peut indirectement contribuer à la production agricole en assurant le maintien de certaines espèces (carabes, oiseaux ou pollinisateurs) qui peuvent contribuer à la régulation de ravageurs de culture ou à la pollinisation des cultures. Ainsi, promouvoir de la diversité végétale dans les

systèmes agricoles est une question importante pour le développement de nouveaux systèmes performants tant au niveau agronomique qu'environnemental. Toutefois la quantification des services rendus réellement par la flore adventice reste actuellement difficilement réalisable.

I.3 - Contexte de mes travaux sur les adventices

L'agroécosystème a été créé par l'homme il y a 10 000 ans au moment de la révolution du Néolithique. Il est depuis en constante évolution en lien avec les progrès techniques. Les espèces adventices sont désignées comme une des conditions limitantes à la production agricole. La présence des adventices va donc générer des actions de régulation ou de destruction de la part des agriculteurs.

Ainsi de tout temps, les agriculteurs ont mis en place des pratiques agricoles afin d'optimiser leur contrôle. Depuis le début du XX^{ème} siècle dans les pays développés, l'utilisation des produits phytopharmaceutiques (PPP) d'origine minérale s'est largement répandue dans la plupart des systèmes agricoles en particulier pour contrôler les adventices (Pousset, 2003). Les premiers herbicides de synthèse utilisés dans le monde furent les colorants nitrés dérivés du benzène. Après la Seconde Guerre mondiale, l'industrie chimique a développé des molécules spécifiques "herbicide" qui miment les hormones végétales pour désherber les céréales telles que le 2,4-D (acide 2,4-dichlorophénoxyacétique) et le 2,4-MCPA (acide 2-méthyl-4-chlorophénoxyacétique) (Bain *et al.*, 2010), ces deux herbicides étant toujours autorisés et appliqués actuellement en France. L'industrie chimique a produit de plus en plus de substances sélectives ciblant spécifiquement des adventices. Les variétés et la consommation de ces produits dans le monde ont augmenté au cours du temps (Zhang *et al.*, 2011). La situation en 2014 en France pour les Grandes Cultures est qu'une majorité des surfaces cultivées reçoit systématiquement au moins une application d'herbicide (part de surface traitée, de 83 % pour le triticale à 100 % pour la betterave sucrière) (Agreste, 2014).

Une étude réalisée avec des données de 2004 à 2011 sur le site de Fenay (commune de Côte d'Or) spécialisé dans les Grandes Cultures (une des zones d'étude de l'UMR Agroécologie) a confirmé localement cette importance de l'usage des herbicides pour deux grandes cultures, le blé tendre d'hiver ([AV06]) et le colza ([ACL27]). Au moins un traitement herbicide a été réalisé pour 99 % des parcelles en blé tendre d'hiver (294 situations) et pour la totalité des parcelles en colza (117 situations).

L'évolution des pratiques culturales ne concerne pas que l'augmentation des apports d'intrants tels que les herbicides (Gasquez, 2005). Les agroécosystèmes anciennement organisés en mosaïque de petites parcelles ont été remembrés et sont maintenant composés de parcelles de plus grandes tailles entraînant une diminution des espaces hors champs et une réduction des connexions entre les parcelles. Cette diminution des connexions entre les populations d'une même espèce peut engendrer des problèmes de reproduction pour certaines espèces dont des adventices. Ainsi l'intensification des pratiques agricoles a provoqué la raréfaction d'adventices des agroécosystèmes et plus spécifiquement les espèces dites spécialistes (Robinson et Sutherland, 2002 ; Fried *et al.*, 2008).

La gestion actuelle des adventices est donc fortement remise en cause ; les produits phytopharmaceutiques, en particulier les herbicides, sont pointés du doigt pour leurs impacts (environnement, santé, ...). Cette remise en cause des moyens de gestions actuels nécessite la mise en place de nouveaux systèmes de culture pour répondre aux nouveaux enjeux économiques et environnementaux de l'agriculture.

Le statut des adventices reste toujours un sujet de recherche et de discussion important. Le choix du statut a une influence sur le ou les modes de gestion proposés. Seule une partie de ces questionnements sur les adventices seront abordés dans les chapitres suivants. **Les travaux réalisés sur les adventices et présentés dans la suite du document concernent essentiellement la nuisibilité pour les cultures, des impacts de la gestion actuelle des adventices, et la problématique de la gestion durable des espèces adventices** (Figure 1).

Dans un premier temps, je vais tenter de mieux décrire la nuisibilité engendrée par la flore adventice. Pour réduire la nuisibilité, les agriculteurs mettent en place des actions de désherbage (chimique, mécanique ou autre) qui engendrent des coûts pour l'agriculteur et des effets plus ou moins néfastes sur l'environnement. Ainsi il est nécessaire de mieux caractériser la nuisibilité liée à la flore adventice afin de justifier les actions de gestion.

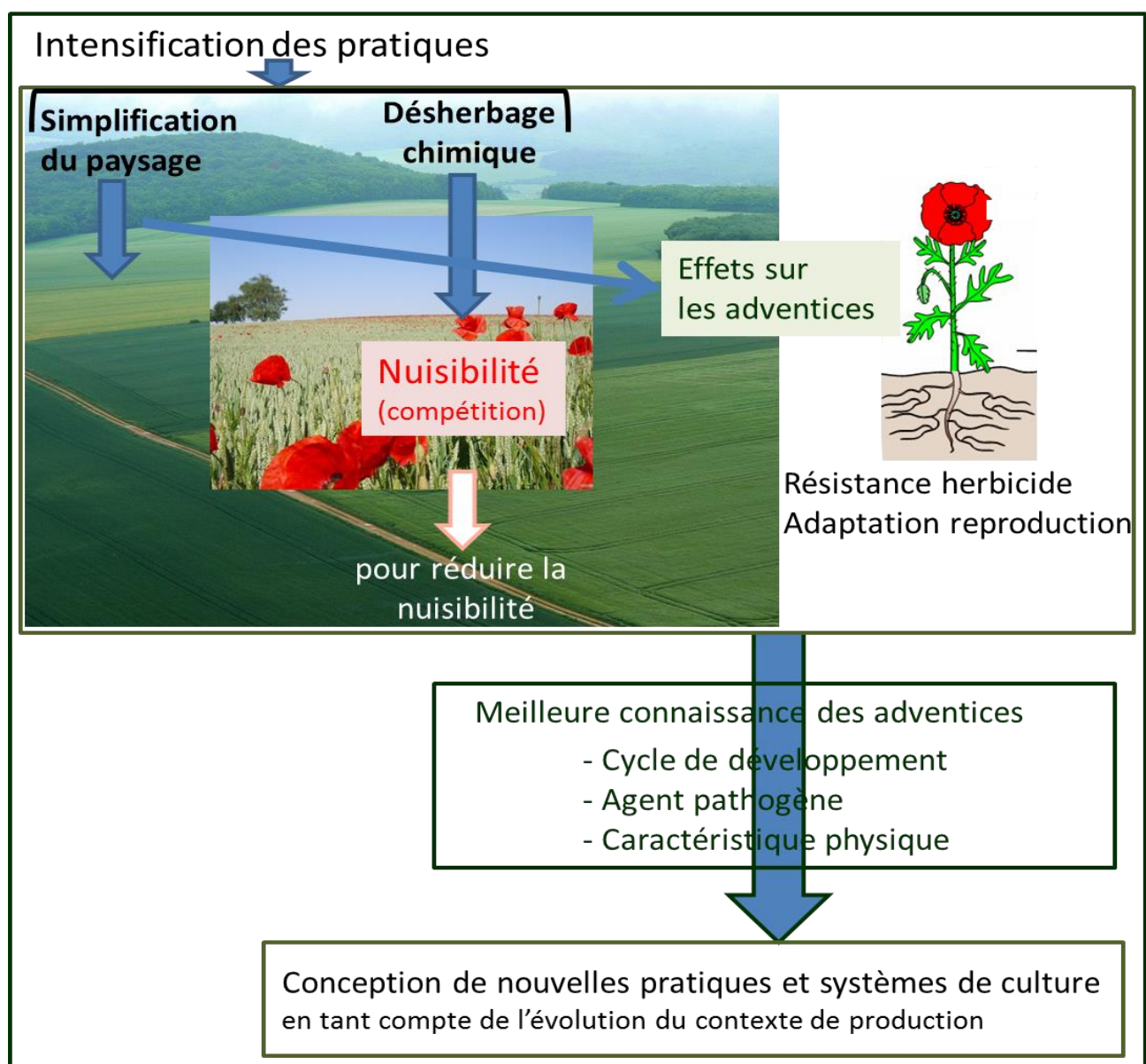


Figure 1 : Représentation générale des travaux de recherche réalisés sur la thématique des adventices et présentés dans le document.

Je propose ensuite d'analyser l'intérêt pour la production de mettre en place des pratiques de désherbage et les conséquences possibles sur les adventices et l'évolution de cette flore (résistance aux herbicides, raréfaction de certaines espèces, ...).

Le développement de pratiques innovantes de gestion passe encore aujourd'hui par un besoin accru d'acquisition de connaissances sur les adventices telles que des données permettant de décrire et suivre leur développement et leur croissance, et d'évaluer l'effet de facteurs abiotiques (humidité, profondeur d'enfouissement, ...) et biotique (présent d'un couvert, ...) afin de mieux connaître leur fonctionnement et leurs capacités d'adaptation dans les agrosystèmes. Ces nouvelles connaissances doivent contribuer à la conception de techniques durables, quelque fois en rupture avec les pratiques habituelles, le tout dans un contexte de production agricole en constante évolution (par ex. évolution de la réglementation, ...). Parmi les évolutions observées, le développement de la résistance aux herbicides est devenu un phénomène majeur amenant à la mise en place de nouvelles combinaisons de pratiques de gestion des adventices par les agriculteurs.

Dans le contexte de l'intégration de pratiques culturales innovantes dans les nouveaux systèmes de culture, la **recherche de candidats d'origine microbienne à activité herbicide sur les adventices** est une solution d'avenir dans laquelle je souhaite m'impliquer de façon active.

II. La nuisibilité des adventices

II.1 – Etude du niveau de nuisibilité des adventices

La nuisibilité produite par les adventices apparaît comme une évidence mais sa quantification n'est que très rarement évaluée (Oerke et Dehne, 1997 ; Oerke, 2006). A partir d'estimations mondiales, Oerke (2006) évalue les pertes de rendement de la culture du blé liées aux adventices entre 7,7% (perte estimée) et 23% (perte potentielle). Avec plus de 1 600 essais en Suède, Milberg et Hallgren (2004) estiment la perte de rendement à 5,4% des céréales d'hiver. Aucune étude sur un effet global des adventices sur le colza et le tournesol n'existe à ce jour.

Pour obtenir des évaluations de pertes de rendement liées à la présence de la flore adventice, l'idée a été d'utiliser les essais de désherbage réalisés par différents instituts techniques et coopératives agricoles du Réseau InVivo en France. Cette analyse a été réalisée au sein de l'UMR Agroécologie avec le concours du RMT Florad. L'objectif a été de mesurer les différences de rendements entre des parcelles non désherbées et désherbées chimiquement, et d'identifier des liens de causalités avec la flore adventice pour trois grandes cultures dans une large gamme de situations pédo-climatiques ([AC23]). Je ne présenterai dans ce document que les résultats pour le blé tendre d'hiver et le colza d'hiver.

L'étude complète rassemble 110 essais « désherbage » menés en France entre 1993 et 2015, dans 96 communes réparties sur 41 départements (Figure 1). Les deux cultures étudiées comportent 63 essais de blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L.) et 39 essais de colza (*Brassica napus* L.) bien répartis dans leurs bassins de production (Figure 2). La flore adventice est évaluée dans les parcelles témoin non traitée à la date du traitement réalisé sur les parcelles traitées. L'efficacité de désherbage (%) est estimée en comparaison au témoin non traitée. Le rendement de la culture est évalué sur chaque parcelle témoin non traitée et traitée.



Figure 2 : Répartition des essais désherbage chimique par culture. Chaque point représente une commune où a été mené au moins un essai « désherbage » (essai « efficacité d'herbicides ») ([AC23]).

Le blé tendre d'hiver

Sur les 63 essais en blé tendre d'hiver, 92% montrent une perte significative de rendement lorsque la parcelle n'est pas traitée (Figure 3). La perte moyenne de l'ensemble des essais est de -26 q/ha. La plage de variation des valeurs est importante avec des pertes de rendements qui peuvent atteindre -64 q/ha et un gain maximal de 0,8 q/ha.

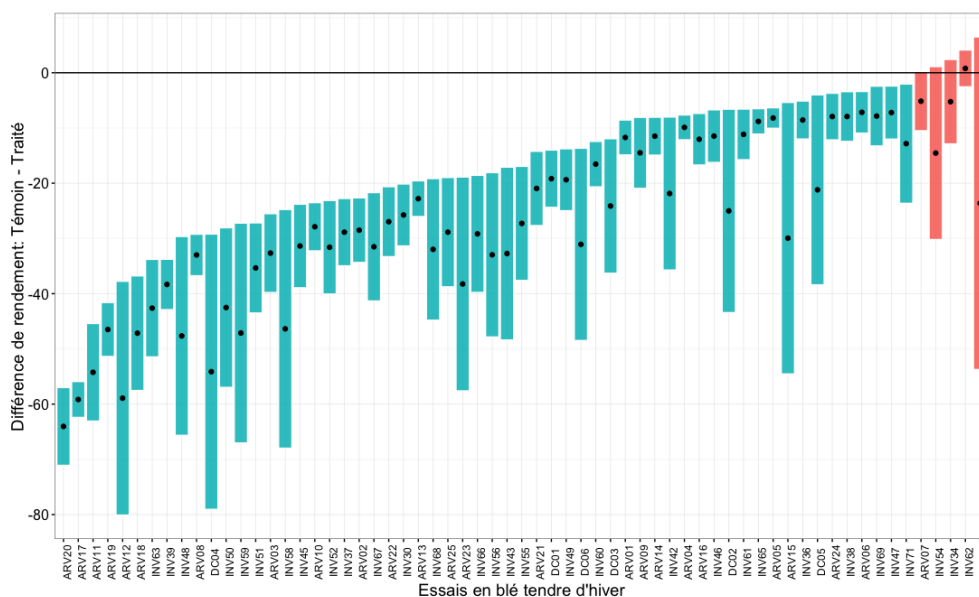


Figure 3 : Différences de rendement (q/ha) en blé tendre d’hiver entre les parcelles non traitées (Témoin) et les parcelles traitées pour les 63 essais. Les points noirs représentent la différence de rendement moyen d’un essai. La longueur de la barre représente l’intervalle de confiance à 95%. Les essais présentant une différence significative (seuil de 5%) de rendement sont en bleu et ceux sans différence significative en rouge ([AC23]).

Le colza d’hiver

La moitié des 29 essais en colza d’hiver (51%) comportent une perte de rendement lorsque la parcelle n’est pas traitée (Figure 4). La perte de rendement moyenne sur l’ensemble des essais est de -3,5 q/ha, avec une plage de variation allant de -12,4 à 3,8 q/ha.

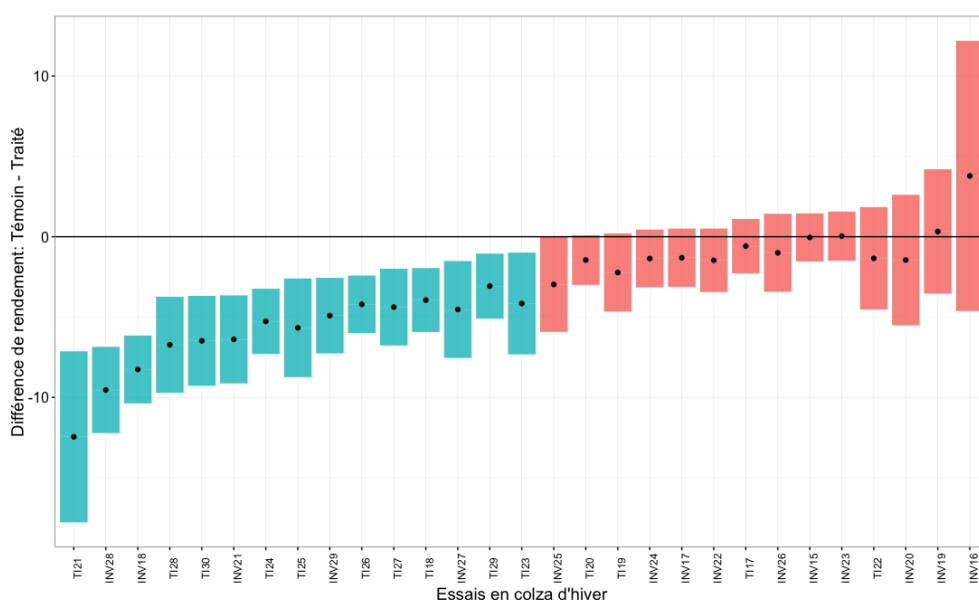


Figure 4 : Différences de rendement (q/ha) en colza entre les parcelles non traitées (Témoin) et les parcelles traitées pour les 29 essais. Les points noirs représentent la différence de rendement moyen d’un essai. La longueur de la barre représente l’intervalle de confiance à 95%. Les essais présentant une différence significative (seuil de 5%) de rendement sont en bleu et ceux sans différence significative en rouge ([AC23]).

Pour les deux cultures, l'analyse des essais « désherbage » montre des différences de rendements entre parcelles témoins non traitées et parcelles traitées qui se traduisent, lorsqu'elles sont significatives, par des pertes. Aucune situation de parcelle sans désherbage ne présente de gain de rendement significatif. Néanmoins, pour les deux cultures, une forte variabilité des valeurs estimées est observée. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de cette variabilité : conditions du milieu, gamme des traitements testés et de leur efficacité, diversité de la flore dominante et de sa densité, ...

Relation entre perte de rendement et flore adventice : le cas du colza

Les essais désherbage qui montrent une perte de rendement significative (partie gauche Figure 5) présentent globalement dans les témoins non traités des densités d'adventices élevées entre 50 et 250 plantes/m² et des efficacités de désherbage très variables (Figure 5). Ainsi, des flores précoces et/ou installées après le traitement ont pu rentrer en concurrence avec la culture. Quelques exceptions sont observables (essais TI30, TI27 et TI18) (Figure 5) ; ceci indique que la flore précoce était peu dense et l'était encore moins après désherbage, et a pourtant conduit à des pertes de rendement. Les essais désherbage colza qui ne montrent pas de perte de rendement significative (partie droite Figure 5) présentent globalement un niveau de flore adventice dans le témoin non traité plus faible que ceux avec une perte de rendement significative (Figure 5).

Il existe très peu d'articles dans la littérature scientifique qui décrivent la nuisibilité des adventices sur le rendement du colza (Lutman *et al.*, 2000 ; Primot *et al.*, 2006). La capacité du colza à compenser une croissance faible en début de cycle est connue (Valantin-Morison et Meynard, 2008). Pourtant, il a bien été identifié par diagnostic agronomique que les adventices sont un des facteurs les plus limitants du rendement du colza (Valantin-Morison et Meynard, 2008). Ces résultats mettent en avant toute la difficulté à estimer de façon fiable les pertes de rendements liés à la flore adventice.

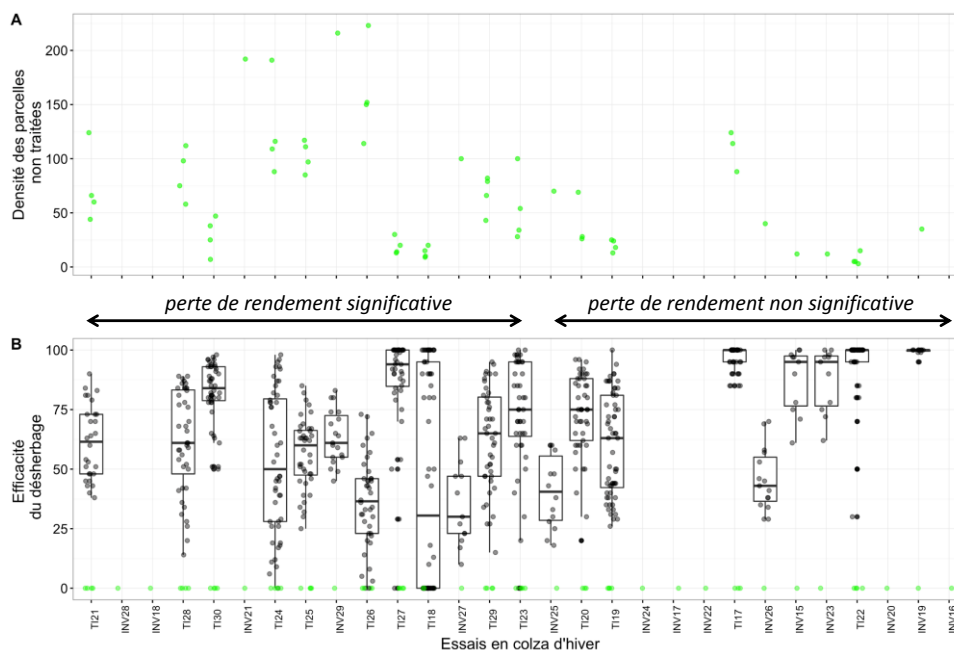


Figure 5 : Densité adventice (plantes/m²) dans les témoins non traités (A) et efficacité de désherbage (en %, B) des 29 essais en colza d'hiver. Les essais sont ordonnés selon l'importance de l'effet TNT-T (Figure 3). Les points verts et noirs sont respectivement les parcelles témoins non traités et traités. La hauteur des boîtes à moustaches représente la variabilité des parcelles traitées seulement ([AC23]).

Exploitation des essais « désherbages » pour étudier la nuisibilité

Dans ce type d'essai, la flore n'a été ni sélectionnée, ni semée, contrairement à la majorité des études réalisées pour quantifier la nuisibilité. Semer ou repiquer des adventices à des densités déterminées, en même temps que la culture a pour conséquence de potentiellement surestimer la nuisibilité en mettant les adventices dans des conditions artificiellement plus favorables qu'elles ne le seraient dans une parcelle. Les essais désherbage analysés ici constituent donc des situations d'étude qui se rapprochent de parcelles dans lesquelles la flore n'a pas été particulièrement manipulée.

Nous avons émis l'hypothèse que la densité de flore sur le témoin non traité était homogène sur l'ensemble de la zone de l'essai. Même si les essais sont mis en place sur une partie d'une parcelle, en général la flore adventice n'est pas répartie de manière totalement homogène mais plutôt en taches (Cardina *et al.*, 1997) à l'intérieur desquelles les espèces et les densités peuvent varier.

Ces travaux confirment que la densité de plantes adventices n'est pas un indicateur de nuisibilité très robuste. La densité de plantes présente au moment de la mesure ne donne pas d'informations sur la période d'émergence de la flore et donc la durée de co-occurrence avec la culture (Knezevic et Datta, 2015). Ainsi l'analyse de l'effet de la date de traitement est une piste à explorer.

La flore adventice présente dans une parcelle est généralement plurispécifique avec quelques espèces dominantes qui peuvent être différentes d'un essai à l'autre. Toutes les espèces n'ont pas la même capacité à rentrer en compétition avec la culture. Une étude approfondie des pertes de rendements en fonction des contextes floristiques apparaît pertinente. La densité des espèces majeures a été estimée que pour certains essais. Avec un jeu de données plus important, il sera possible d'étudier la nuisibilité de communautés d'adventices (assemblages d'espèces) et d'estimer la contribution de chaque espèce à la nuisibilité globale (Swinton *et al.*, 1994 ; Florez *et al.*, 1999).

Il pourrait être intéressant (mais chronophage) de disposer sur les essais d'un témoin « 0 adventice » obtenu sans désherbage chimique afin d'éliminer les effets potentiels de l'herbicide sur la culture. Dans cette étude, le traitement herbicide peut contrôler la flore adventice avec une efficacité de parfois 100% mais probablement être également à l'origine de phytotoxicité difficile à évaluer.

Pour conclure, l'utilisation des essais désherbage souffre d'un certain nombre de limites pour analyser complètement la « nuisibilité » des adventices. Cependant ce travail montre que de tels essais avec des observations supplémentaires et des modalités ajoutées pourraient permettre de mieux estimer la nuisibilité des adventices. Il ressort de ces premières analyses l'importance d'étudier la nuisibilité de la flore adventice en caractérisant l'infestation initiale, la composition spécifique en adventices, la date du désherbage, l'efficacité du désherbage, la mise en place de témoin « 0 adventice » sans application d'herbicide...

De plus la densité n'étant pas un indicateur très robuste pour estimer la nuisibilité, d'autres indicateurs comme la biomasse (feuilles et racines) produite (Milberg et Hallgren, 2004) ou la surface foliaire relative (Kropff et Spitters, 1991) ont été testés et identifiés comme de meilleurs indicateurs de la nuisibilité. Ces variables traduisent de façon plus satisfaisante le 'rapport de force' entre la culture et l'adventice dans la capture et la transformation des ressources (lumière, eau, nutriments). Ce type d'indicateurs est intéressant pour étudier la nuisibilité *via* la concurrence entre adventices et cultures.

II.2 – Compréhension de la concurrence exercée par les adventices

La nuisibilité est en partie due à la compétition pour l'accès aux ressources exercée par les adventices sur les plantes cultivées. La compétition entre espèces fait intervenir différents processus, les principaux étant le partage de la lumière, l'eau et l'azote (Rajcan et Swanton, 2001). Le choix a été fait d'étudier par une approche expérimentale le partage de la ressource "lumière" entre un peuplement cultivé et la communauté d'adventices de la parcelle. Ces travaux entrepris en 1997 avec un collègue de l'ENESAD (J.M. Thomas) ont consisté à l'analyse de la concurrence exercée par des populations d'adventices (communauté d'espèces adventices) sur une culture de type sarclé (*Allium cepa* L.).

II.2.1 - Analyse de la concurrence dans une parcelle cultivée

Si la présence d'adventices peut être à l'origine de réduction de rendement des plantes cultivées, il existe des différences de sensibilité des espèces cultivées vis-à-vis de la concurrence exercée par les adventices (Van Heemst, 1985) ; l'oignon fait partie des plantes cultivées pour lesquelles cette concurrence est particulièrement impactante (Brewster, 1990 ; Thomas et Juncker, 1995). En effet le développement aérien de l'oignon est faiblement couvrant et sa conduite de type culture sarclée impose des inter-rangs de forte largeur (au moins 30 cm).

Les expérimentations ont été conçues afin de créer des situations variées de concurrence. Quatre traitements de désherbage ont été mis en place en tenant du fait de désherber la culture jusqu'à la 8^{ème} semaine afin de préserver le rendement (Gazdag Torma, 1997) :

- T0 : culture d'oignon sans adventice ;
- T6 : culture d'oignon désherbée durant 6 semaines ;
- T7 : culture d'oignon désherbée durant 7 semaines ;
- T8 : culture d'oignon désherbée durant 8 semaines (annexe 2).

L'analyse a consisté à suivre et à modéliser le développement du couvert végétal des oignons avec ou sans adventices, et à estimer l'efficacité d'interception et de conversion du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) (Varlet-Grancher et Bonhomme, 1982). Ces travaux ont été financés par la Région Bourgogne dans le cadre d'un « accueil nouvelle équipe ».

Développement et production d'oignon

L'arrêt du désherbage entraîne des réductions de rendement (Tableau 1) qui sont d'autant plus importantes que l'arrêt du désherbage est précoce (- 9% pour T8, - 58% pour T7 et - 79% pour T6) ([AC01]). La production de bulbes passe par la mise en place et la production de feuilles décrite par l'évolution de la surface foliaire verte (photosynthétiquement active) exprimée en fonction de la somme de températures calculée en base 6°C (Chaux et Foury, 1994).

Pour comparer les conséquences des durées de désherbage, nous avons modélisé la mise en place du couvert photosynthétiquement actif en s'inspirant du module « croissance aérienne » du modèle STICS (Brisson *et al.*, 1998), qui correspond à la différence entre la surface foliaire dite potentielle et la surface non chlorophyllienne (jaunissement puis dessèchement) d'un couvert végétal (Figure 6).

Ce modèle a pour équation :

$$LAI_j = LAI_p * \left\{ \left[\frac{1}{1 + \exp(-b * S_j - T_i)} \right] - \exp(a * S_j - T_f) \right\}$$

avec LAI_j Indice de surface foliaire à la date S_j
LAI_p Indice de surface foliaire potentiel
S_j Somme de températures (base 6°C) depuis le début d'émission des feuilles

- T_i Début du jaunissement des feuilles (exprimé en somme de températures)
- T_f Dessèchement complet des feuilles (exprimé en somme de températures)
- b Vitesse maximum de croissance des feuilles
- a Vitesse maximum de sénescence

Pour tous les traitements, la période totale pendant laquelle le couvert a une activité photosynthétique active est sensiblement la même (Figure 6). Par contre en présence d'adventices, la sénescence des feuilles commence plus précocement (Figure 6) d'autant que la concurrence peut s'installer précocement. Ce phénomène entraîne une réduction de la surface foliaire et donc une limitation de la quantité de rayonnement lumineux intercepté.

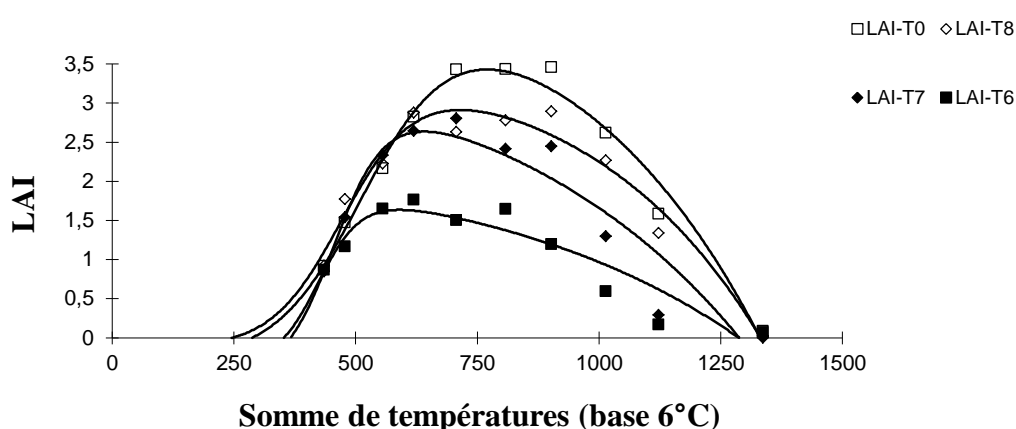


Figure 6 : Influence de la durée de désherbage sur l'évolution de l'indice de surface foliaire (LAI) en fonction de la somme de température (T0, sans adventice ; T6, désherbé durant 6 semaines ; T7, désherbé durant 7 semaines ; T8, désherbé durant 8 semaines) ([AC01]).

Efficiences d'interception

L'efficiences d'interception est estimée en utilisant le modèle d'évolution de l'interception proposé par Varlet-Grancher *et al.* (1989) :

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i,max} [1 - \exp(-k \cdot LAI)]$$

Pour la plupart des cultures, la valeur de $\varepsilon_{i,max}$ se situe autour de 0,95 (Varlet-Grancher *et al.*, 1989). Par contre, Mondal *et al.* (1986) considèrent que la géométrie particulière des feuilles d'oignon limite la valeur maximale du coefficient d'interception à 0,85.

La présence d'adventices ne modifie pas le comportement de l'oignon vis à vis de l'interception (captation) du rayonnement photosynthétiquement actif ($k = -0,38$ pour T0 ; $k = -0,38$ pour T6 ; $k = -0,36$ pour T7 ; $k = -0,35$ pour T8) ([AC02]). Ce résultat confirme l'invariance du coefficient d'extinction pour une culture donnée (Varlet-Grancher *et al.*, 1989). Tous traitements confondus, nous pouvons donc écrire :

$$\varepsilon_i = 0,85 [1 - \exp(-0,37 \cdot LAI)]$$

Efficiences de conversion

La conversion de l'énergie absorbée a été estimée pour différentes situations, oignon désherbé (modalité T0), oignon en présence d'adventices (modalité T6) et adventices seules. La valeur de conversion (ε_b) de l'oignon en l'absence d'adventices est de l'ordre 3,03 (écart-type = 0,10, $r^2 = 0,99$, $p < 0,00$)

conforme aux valeurs de Brewster (1990) (ϵ_b estimé de 2,48 à 3,55). Pour les deux autres situations, adventices seules et oignon en présence d'adventices, les valeurs du coefficient de conversion sont respectivement de 1,29 (écart-type = 0,09, $r^2 = 0,97$, $p < 0,00$) et de 1,55 (écart-type = 0,08, $r^2 = 0,98$, $p < 0,00$) (Figure 6). Ces résultats montrent que la présence d'adventices diminue l'efficacité de conversion de l'énergie reçue par l'oignon.

Cette évolution du comportement de la culture en situation de concurrence pour la lumière expliquerait, au moins en partie, que la biomasse produite par feuille au cours du cycle cultural diminue en présence d'adventices en compétition avec la culture (traitements correspondant aux durées de désherbage de 6 (T6) et 7 semaines (T7)) ([AC04]).

L'analyse de la concurrence pour la lumière liée à la présence d'adventices a permis de montrer des modifications du fonctionnement de l'espèce cultivée. L'obligation pour la plante cultivée de devoir partager la ressource lumière avec une communauté adventice a entraîné des modifications de développement (sénescence plus précoce) et de fonctionnement (altération de la conversion de l'énergie lumineuse) des feuilles qui sont à l'origine des réductions de surface foliaire et donc des réductions de la quantité de rayonnement incident potentiellement interceptable. En situation de peuplement, les feuilles réfléchissent et transmettent à leurs voisines un rayonnement modifié avec une part augmentée de longueurs d'ondes de type infrarouge moins efficace pour la photosynthèse (Bonhomme, 1993). Ces changements de distribution des longueurs d'onde à l'intérieur du couvert végétal sont d'autant plus importants que le peuplement est dense. Ces travaux ont permis de montrer, au moins en partie, en quoi, dans certaines situations, la présence d'adventices peut nuire à l'élaboration du rendement de la culture.

II.2.2 - Capacité de compétition pour la lumière de différentes adventices

Une communauté adventice est composée de plusieurs espèces. Ces différentes espèces présentent des développements foliaires variés et donc des capacités d'interception de lumière différentes. Afin de prévoir la concurrence exercée par une communauté d'adventices pour capter la lumière, il est nécessaire de connaître la composition spécifique de cette communauté et les capacités d'interception lumineuse des différentes espèces la composant. Au niveau de l'espèce, les capacités d'interception lumineuse dépendent en particulier de son développement foliaire (forme, taille, disposition des feuilles, ...). Ces travaux ont été réalisés avec une collègue de l'ENESAD, Sylvie Granger.

Des expérimentations en bac de culture ont été conçues avec des adventices à port foliaire différent (port étalé ou dressé ; dicotylédones vs monocotylédones). Deux adventices sont associées à une plante cultivée (maïs, *Zea mays* L.), *Setaria pumila* (sétaire glauque, port dressé) et *Amaranthus retroflexus* (amarante réfléchie, port étalé). L'impact du port des plantes a été évalué sur la capacité à intercepter les radiations photosynthétiquement actives et sur la croissance du maïs. Ces travaux ont été réalisés avec le matériel financé par la Région Bourgogne dans le cadre d'un « accueil nouvel équipe ».

Au cours de la mise en place des feuilles des adventices, le coefficient d'interception augmente rapidement pour les deux espèces, puis atteint un plateau dont le niveau et la date d'apparition dépendent de l'adventice. Pour le même LAI ($\sim 1,6$), l'efficacité d'interception ϵ_i est plus élevée pour *A. retroflexus* ($\epsilon_i = 0,68$ et $\epsilon_i = 0,77$ pour 2000 et 2001, respectivement) que celle de *S. pumila* ($\epsilon_i = 0,57$, $\epsilon_i = 0,61$ et $\epsilon_i = 0,48$ pour 2000, 2001 et 2003, respectivement) ([AC06]).

Quelle que soit l'adventice, l'effet de la concurrence sur la croissance du maïs se manifeste au-delà de 350°C.jour (base 6°C, Girardin, 2000) (stade 6-7 feuilles), sans qu'il soit possible de distinguer un effet

propre à un type de port de feuille. Une distinction entre les deux groupes, *S. pumila* d'une part, et *A. retroflexus* d'autre part, apparaît effectivement plus tardivement (au delà de 450°C.jour). Afin de quantifier cet effet, le rapport entre surface foliaire du maïs seul et surface foliaire du maïs et de l'adventice a été calculé et comparé au cours du temps (Tableau 1). La valeur 1 correspond au maïs sans compétition. Un effet de la présence des adventices est visible au-delà de 350°C.jour, sans être possible de distinguer un effet de la morphologie de l'adventice. La distinction entre *S. pumila* et *A. retroflexus* apparaît toujours au-delà de 450°C.jour. Ces résultats pourraient être expliqués, au moins en partie, par une capacité d'interception de la lumière différente selon la morphologie des adventices associées à la plante cultivée ([AC05]).

En présence d'adventices, la diminution de la production de maïs s'explique, en partie, par une réduction de sa surface foliaire en accord avec les résultats d'Assemat et Allirand (1995). Cet effet est différent selon les adventices ; les espèces ayant des feuilles à port étalé ont de plus grande capacité de compétition vis-à-vis de l'accès à la lumière. Pour le même indice de surface foliaire, la capacité de concurrence est, au moins en partie, influencée par la forme et l'agencement des feuilles de chaque espèce adventice. Ce type de différence peut justifier des niveaux de concurrence variables amenant à différents écarts de croissance du maïs.

Tableau 1 : Effet de l'espèce adventice (sétaire glauque (*Setaria pumila*) et amarante réfléchie (*Amaranthus retroflexus*)) sur la surface foliaire du maïs pour plusieurs années (nombre d'années entre parenthèse). IC = intervalle de confiance à 95% ([AC05]).

| Somme de température (base 6°C) | <i>Setaria pumila</i> | | <i>Amaranthus retroflexus</i> | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|
| | moyenne | IC | moyenne | IC |
| < 350°C jour | 0,93 (5) | [0,878 ; 1,002] | 0,89 (3) | [0,858 ; 1,121] |
| 350 à 450°C jour | 0,74 (3) | [0,591 ; 0,829] | 0,69 (3) | [0,666 ; 0,714] |
| > 450°C jour | 0,66 (2) | [0,566 ; 0,744] | 0,52 (3) | [0,421 ; 0,619] |

L'objectif de ces travaux était de mieux comprendre le phénomène de compétition pour l'accès à la lumière entre culture et adventice. Le couvert composé d'un peuplement cultivé avec des adventices n'est pas homogène. Cette hétérogénéité a une influence sur la disponibilité de la lumière dans le couvert et va donc influencer l'efficacité de l'utilisation et de la conversion de la lumière en biomasse. Cet effet dépend des espèces (Storkey, 2005), en particulier de leur morphologie. L'intérêt est donc de prendre en compte, dans la conception des modèles de compétition, la morphologie des adventices ainsi que leur plasticité (adaptation en fonction de la lumière disponible dans le couvert) (Ballaré et Casal, 2000) afin d'améliorer les modèles de concurrence du type de ceux développés depuis le milieu des années 1990 (par exemple Wilkerson *et al.*, 1990 ; Kiniry *et al.*, 1992 ; Kropff, 1993). En effet ces modèles sont basés sur le développement d'une canopée comme un volume continu et réparti uniformément dans toutes les directions de l'espace à l'échelle de la parcelle.

II.3 – Intérêt de la gestion des adventices en production végétale

Comme montré précédemment, des pertes de rendement significatives en situations non désherbées sont majoritairement observées sur les deux cultures étudiées que sont le blé tendre d'hiver et le colza d'hiver. La nuisibilité et le coût engendré pour l'agriculteur par ces bioagresseurs des cultures sont plus que

jamais d'actualité dans le monde agricole (Denieul, 2013) comme dans la littérature scientifique (Fickett *et al.*, 2013 ; Fahad *et al.*, 2015 ; Swanton *et al.*, 2015 ; Soltani *et al.*, 2016).

La justification agronomique du désherbage (quelle que soit la méthode utilisée) reste un sujet d'étude important. Dans cette partie, l'objectif était de quantifier les effets directs et indirects (*via* la modulation de pressions exercées sur les adventices) des pratiques agricoles (dont la gestion des adventices) sur la production des cultures (i.e. le rendement). Les effets directs des pratiques agricoles et de la flore adventice sur la production agricole et des pratiques agricoles sur la flore adventice sont connus. Par exemple, le travail du sol peut améliorer la structure du sol pour favoriser l'émergence des cultures, l'établissement de leurs racines et leur croissance initiale (Mead et Chan, 1988). En parallèle, il stimule la germination des semences d'adventices (Bàrberi et Lo Cascio, 2001) ce qui conduit à l'établissement d'une communauté d'adventices susceptible de concurrencer la culture. Des études ont évalué l'impact global d'un système de culture (succession culturale et itinéraire technique appliqué à chaque culture) sur les rendements des cultures et les adventices (par ex. Chikowo *et al.*, 2009). Cependant aucune étude n'a séparé les effets confondants de chaque composante du système de culture. Il s'agit ici de comprendre les relations qui existent entre pratiques agricoles, flore adventice et production agricole. Aucune étude n'a jamais quantifié l'effet indirect des pratiques agricoles sur le rendement *via* des changements de pression exercée par les adventices. La complexité des interactions du système a amené à utiliser une méthode d'analyse globale de modélisation de type PLS-PM (Partial Least Square Path Modeling).

Ces travaux ont exploité les enquêtes agronomiques (pratiques culturales et rendement (Tableau 2)) réalisées chaque année sur le site de Fenay, zone d'étude de l'UMR Agroécologie. Le blé tendre d'hiver (BTH) a été choisi pour mener cette analyse. Dans chaque parcelle, un relevé de flore est effectué chaque année dans une zone de 2000 m². La flore observée est la flore restante après toute action de désherbage. La richesse spécifique, l'abondance totale et l'indice de diversité de Shannon ont été calculés par chaque « parcelle-année » (Tableau 2). Ces travaux réalisés avec plusieurs collègues de l'UMR Agroécologie ont bénéficié de financement de l'ANR AgroBiose.

Le modèle proposé fait l'hypothèse que la production agricole (« *Productivité* ») est liée d'une part aux pratiques agricoles (« *Pratiques agricoles* ») et d'autre part à la pression exercée par la communauté adventice présente dans la parcelle (« *Pression adventice* ») (Figure 7). L'effet des différentes pratiques agricoles est regroupé dans quatre indicateurs (appelé Variable Latente ou VL) : « *Gestion de l'interculture* », « *Semis* », « *Gestion chimique des bioagresseurs* » et « *Fertilisation azotée* ». Chacun de ces indicateurs est estimé à partir de variables mesurées ou observées (appelées Variable Manifeste ou VM). La démarche est similaire pour les indicateurs « *Pression adventice* » et « *Productivité* ». Les différents paramètres décrivant les effets et/ou les relations entre les VL (β) ou les VL et les VM (λ) ont été estimés avec la méthode PLS-PM (Tenenhaus *et al.*, 2005). Nous avons posé comme hypothèse que l'effet indirect des pratiques agricoles sur la production *via* une modification de la pression exercée par les adventices sur la culture est positif, puisque l'effet négatif des pratiques agricoles sur les adventices pourrait compenser l'effet négatif des adventices sur le rendement du blé.

Le rendement moyen du blé tendre d'hiver pour les 152 parcelles étudiées entre 2006 et 2013 a été de 72 ± 11 q/ha avec des variations interannuelles (plus faible moyenne en 2007 avec 63 ± 12 q/ha et plus haute moyenne en 2012 avec 79 ± 7 q/ha) ([AC24], [ACL36]). Après désherbage, la présence des adventices dans les parcelles est modérée avec une moyenne de l'ordre de 5,2 espèces et 3,8 individus m⁻². La richesse spécifique varie de 0 à 18 et l'abondance totale de 0 à 100 individus m⁻². L'abondance des adventices varie entre les années ($p < 0,001$). En ce qui concerne l'usage des herbicides, l'indice de fréquence de traitement

(IFT) (Champeaux, 2006 et 2007) herbicide moyen est de $1,5 \pm 0,7$.

Tableau 2 : Description des variables utilisées dans l'analyse de données. Chaque donnée correspond à une parcelle pour une année donnée ([AC24], [ACL36]).

| Variables latentes (VL) | | Variables manifestes (VM) | Signification | Unité | Moyenne [min-max] (N: Nombre de parcelles) |
|-------------------------|------------------------------------|----------------------------|---|--|---|
| Productivité | | Rendement | Quantité de grains par surface | q/ha | 72 [29-102] |
| Pression adventice | | Abondance | Nombre total d'individus (racine carrée) | Individus m ⁻² | 1,95 [0 – 10,02] |
| | | Richesse | Nombre d'espèces | Pour 2000 m ² | 5,2 [0 – 18] |
| | | Shannon | Diversité taxonomique de Shannon | Pas d'unité | 0,98 [0 – 2,49] |
| Pratiques agricoles | Semis | Date de semis | | Nombre de jour Julien (depuis le 1er juin) | 134 [121 – 168] |
| | | Densité de semis | Densité sur le rang, nombre de plantes par mètre linéaire calculé à partir de la densité de semis et de l'écartement entre rang | Plante m linéaire | 48,1 [33,8 – 72] |
| | Gestion chimique des bioagresseurs | IFT-H | Indice de fréquence de traitement herbicide | Pas d'unité | 1,5 [0,06 – 3,90] |
| | | IFT-F | Indice de fréquence de traitement fongicide | Pas d'unité | 1,36 [0 – 4,7] |
| | | IFT-I | Indice de fréquence de traitement insecticide | Pas d'unité | 0,70 [0 – 3,33] |
| | | IFT-T | Indice de fréquence de traitement total | Pas d'unité | 3,96 [0,97 – 9,46] |
| | | HRAC | Nombre de mode d'action herbicide utilisé par an | Pas d'unité | 1 (N=45) 2 (N=72) 3 (N=29) 4 (N=5) 5 (N=1) |
| | | FRAC | Nombre de mode d'action fongicide utilisé par an | Pas d'unité | 0 (N=3) 1 (N=21) 2 (N=68) 3 (N=40) 4 (N=19) 5 (N=1) |
| | | IRAC | Nombre de mode d'action insecticide utilisé par an | Pas d'unité | 0 (N=58) 1 (N=94) |
| | Gestion de l'interculture | Décompactage | Nombre de décompactage par an (multiplié par -1) | Pas d'unité | 0 (N=126) -1 (N=26) |
| | | Labour | Nombre de labour par an | Pas d'unité | 0 (N=59) 1 (N=93) |
| | | Travail du sol superficiel | Nombre de travail du sol durant l'interculture pour la gestion des pailles et la préparation du lit de semences | Pas d'unité | 0 (N=2) 1 (N=21) 2 (N=41) 3 (N=48) 4 (N=36) 5 (N=3) 6 (N=1) |
| | Fertilisation azotée | Fractionnement | Fractionnement des apports d'azote : nombre d'apport. | Pas d'unité | 1 (N=4) 2 (N=25) 3 (N=91) 4 (N=26) 5 (N=6) |
| | | Dose | Quantité total d'azote apportée par an | Kg N.ha ⁻¹ | 80,5 [52 – 266] |

La variable « *Pratiques agricoles* » est très bien expliquée ($R^2 = 0,99$) par les autres variables de pratiques (Figure 7) : trois des VL sont corrélés positivement et significativement (« *Gestion chimique des bioagresseurs* », « *Fertilisation N* » et « *Gestion de l'interculture* ») alors que la VL « *Semis* », l'est négativement. C'est la VL « *Gestion chimique des bioagresseurs* » qui présente la plus forte relation avec « *Pratiques agricoles* » ($\beta = 0,46$). La VL « *Pression adventice* » est faiblement expliquée par les variables choisies pour la décrire ($R^2 = 0,04$).

L'effet direct de « *Pratiques agricoles* » sur « *Productivité* » est positif ($\beta = 0,32$) alors qu'il est négatif sur « *Pression adventices* » ($\beta = -0,19$) (Figure 7). Ce dernier est plus élevé que l'effet négatif « *Pression adventices* » sur « *Productivité* » ($\beta = -0,12$). Il en résulte que l'effet indirect des pratiques agricoles sur la productivité *via* un changement de pression exercée par les adventices est faible mais positif ($\beta = -0,19 \times -0,12 = 0,02$). Cet effet indirect positif démontre que les pratiques agricoles ont un impact positif sur la productivité grâce à une baisse de la pression adventice. L'accumulation de ces deux effets directs et indirects des pratiques agricoles sur la productivité conduit à un effet positif sur la productivité (effet total = $0,32 + 0,02 = 0,34$) ; pour ce jeu de données, nous avons estimé que l'effet indirect des pratiques agricoles sur la productivité *via* le contrôle des adventices est positif et est de l'ordre de 7% de l'effet total.

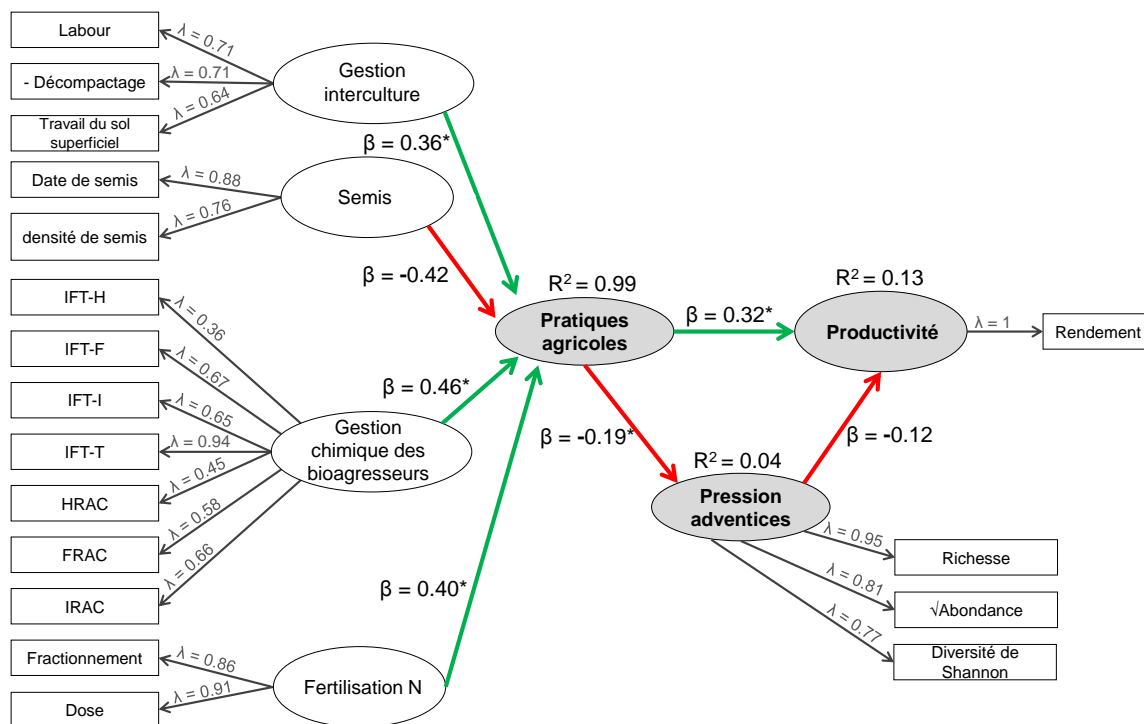


Figure 7 : Relations entre pratiques agricoles, flore adventice et rendement du blé tendre de 152 parcelles analysées par PLS-PM. Les coefficients β estiment la force et le sens (rouge = négatif, vert = positif) du lien entre les indicateurs (variables latentes VL, ellipse). Les coefficients λ estiment la corrélation entre les variables observées (variables manifestes VM, rectangles) et les indicateurs (VL) qu'elles décrivent (ellipse). Les étoiles indiquent que les coefficients β sont significativement différents de 0 selon un intervalle de confiance de 95%. La signification des variables est détaillée dans le tableau 2 ([AC24], [ACL36]).

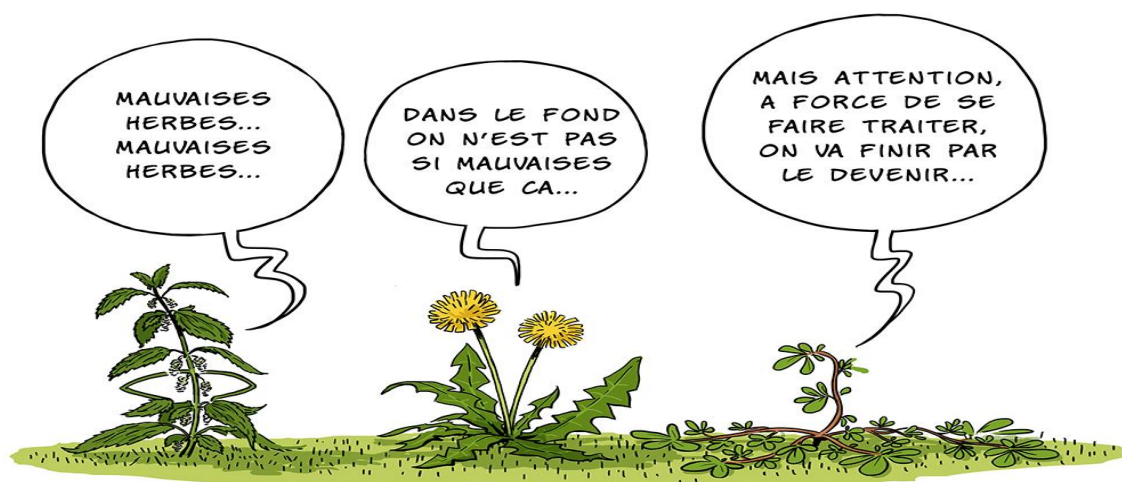
Nos résultats confirment que les pratiques agricoles réalisées ont été efficaces (effet positif) pour assurer la production du blé (rendement moyen du site de Fenay supérieur au rendement moyen de la Bourgogne). La modélisation PLS-PM a permis d'identifier que l'effet des pratiques sur la flore (effet négatif, $\beta = -0,19$) était suffisamment fort pour contrebalancer l'effet négatif de la flore sur le rendement ($\beta = -0,12$), et ainsi assurer le maintien de l'expression du rendement. Ceci confirme donc notre hypothèse initiale que l'effet indirect est positif, et que gérer la flore de manière efficace permet de maintenir le potentiel de rendement permis par la mise en œuvre des autres pratiques agricoles. Les pratiques culturales mises en place par un agriculteur dans une parcelle ont pour but d'atteindre l'objectif de rendement qu'il s'est fixé. La modélisation PLS-PM apparaît comme un outil intéressant pour étudier et analyser les effets des systèmes de culture ; il permet par la construction d'un modèle adapté et en cohérence avec les connaissances de l'agroécosystème de tenir compte et d'estimer des effets directs et indirects.

III. Les impacts de l'intensification de la production sur les adventices

Dans les pays développés, l'intensification des pratiques culturales depuis la seconde guerre mondiale n'a cessé d'augmenter, au point de devenir un facteur majeur d'évolution des communautés végétales et animales dans les agrosystèmes ; c'est dans ces écosystèmes que le nombre d'espèces en déclin est le plus important (Robinson et Sutherland, 2002). Parmi ces espèces, se trouvent des adventices des cultures (Fried *et al.*, 2009 ; Meyer *et al.*, 2013). La flore adventice est constituée d'un ensemble d'espèces dont le point commun est l'aptitude à se maintenir face aux pressions de sélection exercées par les perturbations et les stress liés à l'ensemble des pratiques culturales. Il est largement admis actuellement que cette évolution de l'agriculture a produit des effets négatifs sur l'environnement (uniformisation du paysage, baisse de biodiversité associée aux milieux agricoles, apparition d'individus résistants aux pesticides...) (Stoate *et al.*, 2009).

Les successions culturales se sont simplifiées avec une réduction de la diversité des cultures pouvant aller pour certaines jusqu'à la monoculture d'espèce annuelle. Les itinéraires techniques appliqués ont évolué vers une intensification avec des apports quasi-systématiques d'engrais et de pesticides. La stratégie majoritairement utilisée depuis les années 1950 et jusqu'à présent dans les pays développés pour contrôler les adventices, repose sur l'application d'herbicides de synthèse. En France, les herbicides représentaient 43,8% de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques en 2014 (UIPP, 2018). La sélection exercée par les herbicides depuis la seconde guerre mondiale n'a cessé d'augmenter jusqu'à très récemment, au point de devenir un facteur majeur d'évolution des espèces adventices avec le développement de phénomène de **résistance vis-à-vis de ces pesticides**.

De plus, les remembrements successifs ont modifié le paysage agricole le faisant passer d'une mosaïque composée de nombreuses petites parcelles à un assemblage de grandes parcelles. Cette pratique a entraîné une uniformisation et une fragmentation de l'habitat qui a diminué les connectivités entre les parcelles (Trakhtenbrot *et al.*, 2005). Ce phénomène représente actuellement une **menace pour le maintien de certaines populations d'adventices** (Young *et al.*, 1996).



III.1 - Développement de la résistance aux herbicides chez le vulpin

Le développement de résistance à une molécule herbicide constitue sans doute le cas d'adaptation le plus extrême des populations d'adventices. Ce type de résistance a été observé chez d'autres bioagresseurs des agrosystèmes soumis à des pressions de sélection similaires, principalement les insectes, les acariens, et les champignons et oomycètes phytopathogènes. Deux types majeurs de résistance existent, la résistance liée à la cible (RLC) et la résistance non liée à la cible (RNLC). La résistance liée à la cible correspond à une modification de la cible de la molécule herbicide ou à une surexpression de la cible, et se produit suite à la mutation d'un ou un nombre très réduit de gènes. La résistance non liée à la cible est due à de nombreuses modifications génétiques dans le contrôle du métabolisme de la plante ; plusieurs mécanismes ont été décrits comme de la RNLC telles que la réduction de la pénétration de l'herbicide, l'altération de la translocation de la molécule, la métabolisation (« détoxification ») de la molécule herbicide (Délye *et al.*, 2013). La résistance liée à la cible et la métabolisation de l'herbicide sont aujourd'hui les causes des principales résistances observées sur le terrain.

Depuis la mise au point dans les années 1960 d'herbicides sélectifs, simples d'utilisation et très efficaces, la lutte contre les adventices pour les agricultures ayant accès aux herbicides a eu tendance à se réduire à un raisonnement annuel, du choix d'une ou plusieurs molécules herbicides lié à la culture en place. Très rapidement des populations d'adventices résistantes ont été détectées pour des espèces importantes dans les cultures de céréales telles que les ivraies (*Lolium* spp.) et le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*). Chez le vulpin, des résistances de cible et par métabolisation peuvent co-exister chez un même individu. Le problème devient majeur pour les agriculteurs avec une augmentation continue des cas de résistances aux herbicides (<http://www.weedscience.org/summary/home.aspx>).

III.1.1- Importance de la résistance aux herbicides chez le vulpin à l'échelle de la Côte d'Or

Sous l'impulsion de conseillers agricoles et d'une coopérative locale inquiets des problèmes de désherbage observés en céréales d'hiver, une étude de l'importance et de la répartition de la résistance aux principaux herbicides foliaires utilisés pour lutter contre le vulpin des champs dans les céréales d'hiver a été mise en place au sein de l'UMR Biologie et Gestion des Adventices en 2003 à l'échelle du département de la Côte d'Or (financée dans le cadre du projet "Programme DADP Bourgogne").

L'étude a été réalisée à partir de 125 populations prélevées dans des parcelles de blé d'hiver en Côte d'Or. La résistance a été recherchée par des tests biologiques pour deux herbicides (dit "fops") inhibiteurs de l'ACCCase (acétyl-coenzyme A carboxylase), le fénoxaprop-P-éthyl (Puma®) et le clodinafop-propargyl (Célio®), et un herbicide inhibiteur de l'ALS (acétolactate synthase), le flupyrsulfuron-méthyle (Oklar®). Des enquêtes agronomiques ont été réalisées sur l'historique cultural (8 années) des parcelles prélevées.

L'étude a permis de mettre en avant que le développement de la résistance était très important au point que, pour un des herbicides étudiés, le fénoxaprop-P-éthyl, molécule très couramment utilisée depuis 1989, toutes les populations échantillonnées sont considérées comme "résistantes" à l'échelle de la Côte d'Or avec un pourcentage élevé de plantes résistantes par population (Tableau 3) ([AV03], [ACL15]). Pour les deux autres molécules herbicides testées, le développement de la résistance est moins marqué, et il est encore possible de trouver des populations "sensibles". Cependant la quasi-totalité (98%) des populations testées sont résistantes au flupyrsulfuron-méthyle avec toutefois un pourcentage de plantes résistantes par population plus faible (Tableau 3). Pour le clodinafop-propargyl, le pourcentage de populations résistantes est de l'ordre de 59% avec un niveau faible de plantes résistantes par population (Tableau 3). Globalement la fréquence des vulpins résistants est déjà très élevée, au point de rendre les molécules testées

‘agronomiquement’ inefficaces.

Tableau 3 : Résultats des tests biologiques sur l'évaluation de la résistance à trois herbicides sur des populations de vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*) prélevées au champ (ACCCase : acétyl-coenzyme A carboxylase ; ALS : acétolactate synthase) ([ACL15]).

| Herbicide | Cible | Nombre de populations testées | Populations avec des individus résistants | % moyen d'individus résistants par population (<i>minimum – maximum</i>) | Populations avec des individus tous sensibles |
|----------------|---------|-------------------------------|---|--|---|
| Fenoxaprop | ACCCase | 125 | 125 | 80,1 % (35 % - 100%) | 0 |
| Flupyrsulfuron | ALS | 124 | 121 | 50,1 % (0 % - 80%) | 3 |
| Clodinafop | ACCCase | 124 | 73 | 18,6 % (0 % - 93%) | 51 |

Dans le cas du fénoxaprop-P-éthyl, il n'est plus possible de déterminer les causes et les zones d'origine. Pour le clodinafop-propargyl, la situation est plus contrastée avec un développement plus important de la résistance au nord qu'au sud du département. L'installation de la résistance à cette molécule n'est probablement pas seulement liée à son application. Les parcelles traitées au fénoxaprop-P-éthyl (au moins 3 applications sur 8 ans) présentent également des niveaux élevés de résistance au clodinafop-propargyl : ceci résulte probablement de phénomène de résistance croisée.

III.1.2 - Résistance aux herbicides chez le vulpin à l'échelle française

Suite à l'étude effectuée en Côte d'Or, nous avons eu l'opportunité d'estimer l'importance relative et la répartition géographique des deux types de résistance (RLC et RNLC) chez le vulpin à l'échelle de la France. Ce travail s'est appuyé sur la précédente étude complétée par des prélèvements réalisés surtout dans le nord-est de la France dans des parcelles où des problèmes de maîtrise du vulpin par des herbicides de type « fops » avaient été signalés.

116 populations de vulpin du nord-est de la France (échantillon appelé France) et 127 en Côte d'Or (soit au total 243 populations) ont été récoltées dans des parcelles de blé tendre d'hiver. Les populations de vulpin ont été analysées à l'aide de tests biologiques de sensibilité à deux herbicides inhibiteurs de l'ACCCase ("fops") (fénoxaprop-P-éthyl (Fx) et clodinafop-propargyl (Cd)) et de tests moléculaires d'identification de résistances de cible. La fréquence de résistance par métabolisation est la différence entre la fréquence de résistance mesurée par les tests biologiques et la fréquence des plantes possédant une résistance de cible. Des enquêtes agronomiques ont été réalisées sur l'historique cultural (6 années) des parcelles prélevées.

Des résistances ont été identifiées dans 241 des 243 populations. L'essentiel (plus de 75%) des résistances aux deux herbicides testés est dû à de la résistance par métabolisation. Toutefois l'importance de la résistance ne semble pas structurer dans l'espace, des parcelles très résistantes pouvant côtoyer des parcelles sensibles ([AV04], [ACL16]).

L'analyse des enquêtes agronomiques s'est concentrée sur les programmes "herbicide". Au total, 76 et 61 molécules d'herbicides ont été appliquées respectivement dans les parcelles étudiées en France et en Côte d'Or. Des herbicides de type "fops" ont été utilisés dans 196 parcelles sur les 233 parcelles enquêtées. Parmi les herbicides de type "fops", 10 et 6 molécules différentes ont été pulvérisées respectivement en France et en Côte d'Or ; le fénoxaprop-P-éthyl (Fx) et le clodinafop-propargyl (Cd) sont les deux herbicides les plus fréquemment utilisés pour les deux échantillons. Aucune des parcelles étudiées en Côte d'Or n'a reçu plus d'une application d'herbicide inhibant l'ACCCase par an (Figures 8 à 10), alors que ce nombre s'est

élevé jusqu'à trois en France. En France, la proportion moyenne de plantes résistant au Fx ou Cd a augmenté significativement pendant la période de l'étude avec le nombre d'applications d'herbicides inhibiteur de l'ACCCase (Figures 8 et 9). La situation en Côte d'Or est différente avec la proportion moyenne de plantes résistant à Fx ou Cd variant peu avec le nombre d'applications d'herbicides inhibiteur de l'ACCCase (Figures 8 et 9). La proportion très élevée de vulpin résistant au Fx observés en Côte d'Or suggère que la résistance était installée antérieurement à la période des enquêtes (Fx a été commercialisé en 1989) ; ceci illustre les limites des enquêtes pour expliquer la sélection de la résistance aux herbicides.

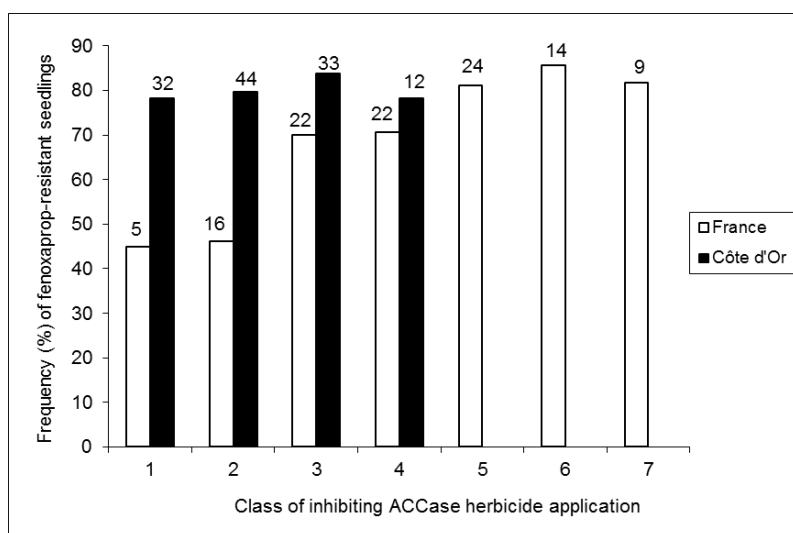


Figure 8 : Pourcentage par population de plantules résistantes au Fenoxaprop (Fx) par classe d'application d'herbicides inhibiteur de l'ACCCase (1 : pas de traitement ; 2 : 0,01 à 0,49 traitement par an ; 3 : 0,50 à 0,74 traitement par an ; 4 : 0,75 à 0,99 traitement par an ; 5 : 1 traitement par an ; 6 : 1,01 à 1,99 traitements par an ; 7 : plus de 2 traitements par an). Les barres creuses correspondent à des populations collectées en France en 2000 et les barres pleines à des populations collectées en Côte d'Or en 2003. Les valeurs sur les barres correspondent au nombre de populations de vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*) ([ACL16]).

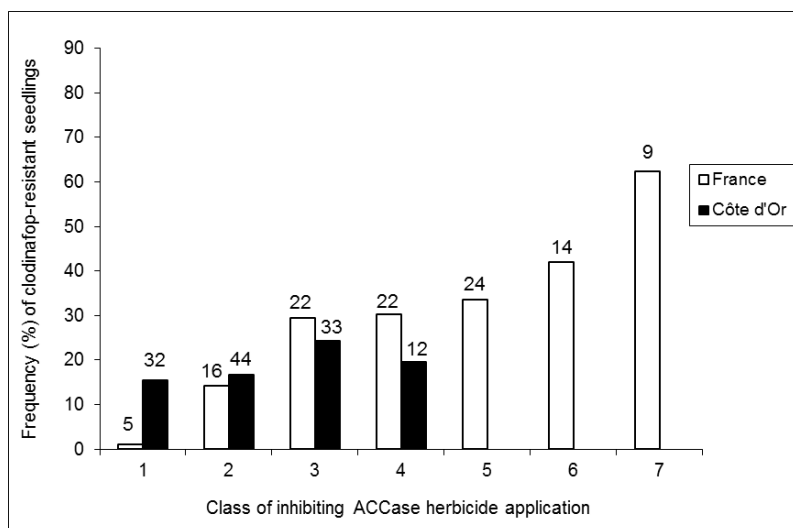


Figure 9 : Pourcentage par population de plantules résistantes au Clodinafop (Cd) par classe d'application d'herbicides inhibiteur de l'ACCCase (1 : pas de traitement ; 2 : 0,01 à 0,49 traitement par an ; 3 : 0,50 à 0,74 traitement par an ; 4 : 0,75 à 0,99 traitement par an ; 5 : 1 traitement par an ; 6 : 1,01 à 1,99 traitements par an ; 7 : plus de 2 traitements par an). Les barres creuses correspondent à des populations collectées en France en 2000 et les barres pleines à des populations collectées en Côte d'Or en 2003. Les valeurs sur les barres correspondent au nombre de populations de vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*) ([ACL16]).

La fréquence des allèles résistant du gène de l'ACCCase détectés pour l'ensemble des populations collectées dans des parcelles traitées avec des herbicides inhibiteurs de l'ACCCase augmente avec le nombre d'applications d'herbicides (Figure 10).

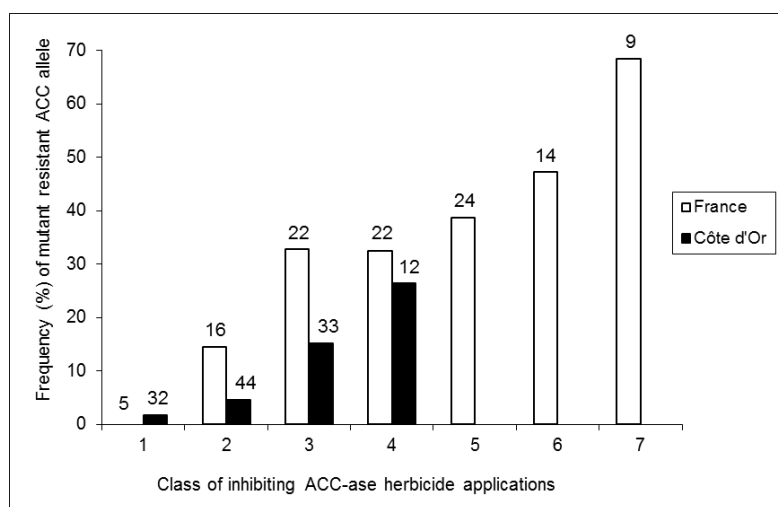


Figure 10 : Fréquence de d'individus présentant une mutation de cible vis-à-vis d'herbicides inhibiteurs de l'ACCCase (1 : pas de traitement ; 2 : 0,01 à 0,49 traitement par an ; 3 : 0,50 à 0,74 traitement par an ; 4 : 0,75 à 0,99 traitement par an ; 5 : 1 traitement par an ; 6 : 1,01 à 1,99 traitements par an ; 7 : plus de 2 traitements par an). Les barres creuses correspondent à des populations collectées en France en 2000 et les pleines à des populations collectées en Côte d'Or en 2003. Les valeurs sur les barres correspondent au nombre de populations de vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*) ([ACL16]).

Aucune application d'herbicides de type "fops" n'a été enregistrée dans 37 parcelles (5 en France, 32 en Côte d'Or) (Figures 8 à 10). Par contre des plantes résistantes sont observées dans ces parcelles (Figures 8 et 9). La résistance au Fx ou au Cd pourrait être un effet secondaire correspondant à de la résistance non liée à la cible produite par l'application d'herbicides avec d'autres modes d'action.

Aucun allèle résistant du gène de l'ACCCase n'a été détecté dans les populations de France où aucune application d'herbicide inhibiteur l'ACCCase n'a été enregistrée (Figure 10). Par contre, des allèles résistant du gène de l'ACCCase ont été détectés dans huit parcelles de la Côte d'Or où aucun herbicide de type "fops" n'a été appliqué pendant les six années des enquêtes (Figure 10). La résistance, ici au fénoxaprop-P-éthyl (Fx) et au clodinafop-propargyl (Cd) observée dans ces parcelles, pourraient trouver plusieurs origines. L'application de tels herbicides aurait eu lieu avant la période des enquêtes. Une autre origine possible de la présence d'allèles résistant du gène de l'ACCCase pourrait être la diffusion à partir d'autres parcelles infestées par des populations de vulpin contenant de tels allèles.

III.1.3 - Résistance aux herbicides chez le vulpin à l'échelle européenne

Cette étude du développement de la résistance aux herbicides du vulpin a pu être menée à une échelle encore plus large qui correspond globalement à son aire de distribution au niveau de l'Europe.

La structuration de la résistance à la famille des inhibiteurs de l'ACCCase a été analysée sur 297 populations de vulpin à l'aide de tests biologiques de sensibilité au fénoxaprop-P-éthyl (Fx) et par la recherche de mutations d'ADN conférant la résistance de cible à la famille herbicides des "fops" dans six pays européens.

La résistance à cette famille a été retrouvée sur l'ensemble des zones d'étude. Si l'on considère le seuil de 50% de plantes résistantes par population, on observe un pourcentage de populations dites

"résistantes" (Tableau 4) qui varie de 13% (Turquie) à plus de 90% (Grande Bretagne ; Figure 13) ([ACL21]).

Du point de vue des mécanismes de résistance, les mutations de cible ne représentent qu'une part mineure des résistances détectées et la distribution des allèles de résistance ne semble pas répondre à un gradient ou à une répartition ordonnée.

Toutefois nous avons pu constater que les différences d'utilisation des herbicides entre pays influenceraient la part du type de résistance observé. En effet la France, où des herbicides agissant sur la même cible sont utilisés seuls et de façon répétée, présente des populations de vulpin résistant avec une part plus importante de résistance liée à la cible alors que l'Allemagne, où les programmes herbicides sont généralement plus diversifiés et moins intenses, présente des populations de vulpin moins résistantes mais surtout composées d'individus présentant de la résistance de type non liée à la cible.

Tableau 4 : Distribution des populations de vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*) suivant leur classe de résistance de 1 (faible niveau) à 4 (niveau élevé de résistance) ([ACL21]).

| Pays | Nombre de populations | Classe de résistance au Fénoxaprop-P-éthyl | | | |
|---------------------------------|-----------------------|--|--------------|----------------|----------------|
| | | 1 0 % | 2 1 à 20% | 3 21 to 50% | 4 + de 50 % |
| France | 66 | 15,2 | 0,0 | 6,1 | 78,8 |
| Grande Bretagne | 84 | 2,4 | 0,0 | 2,4 | 95,2 |
| Belgique | 41 | 17,1 | 0,0 | 24,4 | 58,5 |
| Allemagne | 75 | 14,7 | 8,0 | 21,3 | 56,0 |
| Pays Bas | 14 | 42,9 | 0,0 | 14,3 | 42,9 |
| Turquie | 15 | 80,0 | 0,0 | 6,7 | 13,3 |
| <i>Ensemble des populations</i> | <i>295</i> | <i>16,3</i> | <i>2,0</i> | <i>11,9</i> | <i>69,8</i> |

Conclusion sur la résistance aux herbicides chez le vulpin

Globalement, l'expression de la résistance semble influencée par les pressions de sélection exercées localement par les herbicides. La variation des réponses observées est probablement liée au contexte agricole national (succession culturale spécifique, travail du sol, date de semis, existence de populations résistantes à d'autres herbicides...).

La résistance non liée à la cible, la plus répandue, est extrêmement préoccupante du point de vue agronomique car le profil de résistance croisée souvent associé est imprévisible et peut concerner apparemment n'importe quel herbicide quel que soit son mode d'action. Ainsi l'existence de résistances croisées par métabolisation aux herbicides de type « fops » et aux sulfonyles (inhibiteurs de l'ALS ; Letouzé et Gasquez, 2001) implique d'être très prudent quand il est envisagé d'utiliser l'une de ces familles d'herbicides pour contrôler des populations de vulpin dont la résistance pour un mode d'action est déjà connue.

III.2 – Evolution du système de reproduction du bleuet

Depuis les années 1950, l'intensification des systèmes de culture a provoqué une fragmentation de l'habitat avec un agrandissement des parcelles et une diminution de connectivités entre elles. Cette diminution des connexions entre les populations d'une même espèce peut engendrer des problèmes de

reproduction pour des espèces allogames et entomophiles possédant un système d'auto-incompatibilité tel que le bleuet (*Cyanus segetum*). En effet il peut se produire un isolement des populations impliquant une diminution du nombre de partenaires possibles au cours du temps pouvant entraîner une extinction de la population si ces individus sont en incapacité de produire des semences viables par autofécondation ou croisement avec un apparenté. Toutefois les théories sur l'évolution des systèmes de reproduction chez les plantes prédisent la mise en place de l'auto-compatibilité dans des populations auto-incompatibles lorsque le nombre de reproducteurs devient insuffisant (Porcher et Lande, 2005 ; Willi, 2009).

C. segetum est actuellement en déclin dans certaines régions de France (Baron, 1989) et d'Europe (Wilson, 1993). Les principales causes de sa raréfaction résulteraient de changements dans les pratiques agricoles telles que le tri des semences, l'utilisation d'herbicides, la destruction des bords de champs (considérés comme des zones refuges pour certaines messicoles) ainsi que la conversion de terrains arables marginaux en pâturage (Olivereau, 1996). Cette diminution pourrait être accélérée par la réduction de l'abondance des insectes pollinisateurs. Ces différentes pressions l'ont réduit à des populations de petites tailles et la fragmentation de son habitat a conduit à des extinctions locales.

C. segetum ne peut donc, *a priori*, pas produire de semences en autogamie ou par croisement avec des individus ayant les mêmes allèles d'incompatibilité. Il se pose donc la question de l'adaptation à l'auto-compatibilité de populations de *C. segetum* de l'Ouest de Europe.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la capacité du bleuet de produire des semences viables en condition d'autogamie. Des individus ont été isolés dans des cages « pollen proof ». Trois conditions de reproduction ont été testées : l'allogamie (un couple par cage) avec des mouches comme pollinisateurs, l'autogamie forcée (un individu isolé dans une cage avec des mouches comme pollinisateurs) et l'autogamie "spontanée" (un capitule est isolé sur chaque plante). Ces travaux ont été réalisés au cours d'une thèse financée par la DGER et la région Bourgogne.

Les résultats montrent que le bleuet est bien une espèce strictement entomophile qui ne peut pas produire de semences sans pollinisateurs ; en effet aucun des capitules en situation d'autogamie "spontanée" n'a produit de semences ([ACL28]). Le nombre de semences par capitule produit en situation d'allogamie ($0,268 \pm 0,036$) est significativement supérieur à celui produit en situation d'autogamie en présence de pollinisateurs ($0,019 \pm 0,005$) (Figure 11).

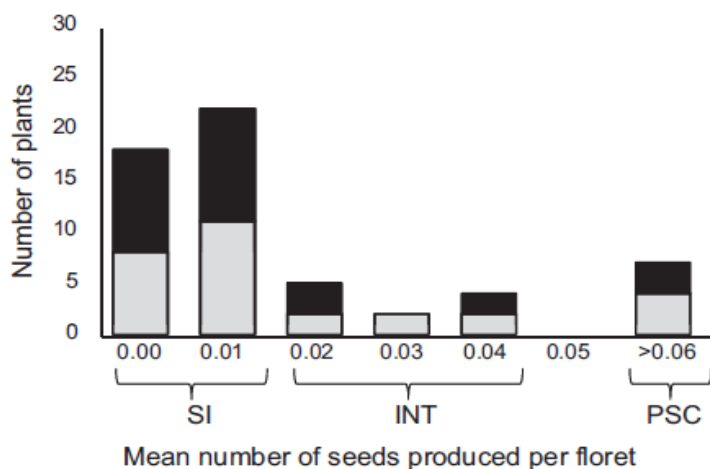


Figure 11 : Nombre de plantes de bleuet (*Cyanus segetum*) de Poitou-Charente (boite noire) et de Bourgogne (boite grise) ayant produit des semences en condition d'autogamie forcée avec un pollinisateur. Le groupe SI (auto-incompatibilité) correspond aux plantes ayant produites moins de 0,02 semence par fleur, le groupe INT (groupe intermédiaire) les plantes ayant produites entre 0,02 à 0,05 semence par fleur et le groupe PSC (pseudo-autocompatibilité) le groupe de plantes ayant produites plus de 0,06 semences par fleur ([ACL28]).

Pour la modalité autogamie "forcée", la majorité des plantes sont auto-incompatibles (IS) mais environ 12% sont considérées comme pseudo auto-compatibles (PSC) avec une production de semences par capitule supérieure à 0,06 (Figure 11).

Le bleuet est capable de mettre en place de l'autofécondation pour se reproduire. Il se pose ensuite la question de savoir si la dépression de consanguinité possiblement induite dans cette situation impacte ou pas le développement et la croissance du bleuet. Ici, nous avons étudié en quoi la dépression de consanguinité serait susceptible d'affecter des individus issus de deux générations d'autofécondation.

Une partie des semences (O_{ut}) ont été produites par croisement de plantes issues de populations d'origine différente. Suite au croisement, six familles (A, B, C, D, E et F) ont été obtenues. Une famille de semences (type S_1) provient de l'auto-fécondation de plantes issues de certaines familles utilisées pour les croisements ; sept familles ont été obtenues (G, H, I, J, K, L et M). Des semences de type S_2 ont été produites par auto-fécondation de plantes issues des semences S_1 (obtention de 7 familles, N, O, P, Q, R, S et T). Ces travaux ont été réalisés au cours d'une thèse financée par la DGER et la région Bourgogne.

Dès la première génération d'autofécondation, des réductions de la hauteur, du nombre de fleurons par capitule et du nombre de semences produites ont été observées ([ACL30]). Au cours de la deuxième génération d'autofécondation, les effets sont encore plus marqués en particulier pour le taux de germination. Des plantes adultes sont obtenues seulement pour quatre familles (O, P, Q et S) (Figure 12). La biomasse végétale aérienne, le nombre final et la masse des semences par plante sont également affectés (Figure 12).

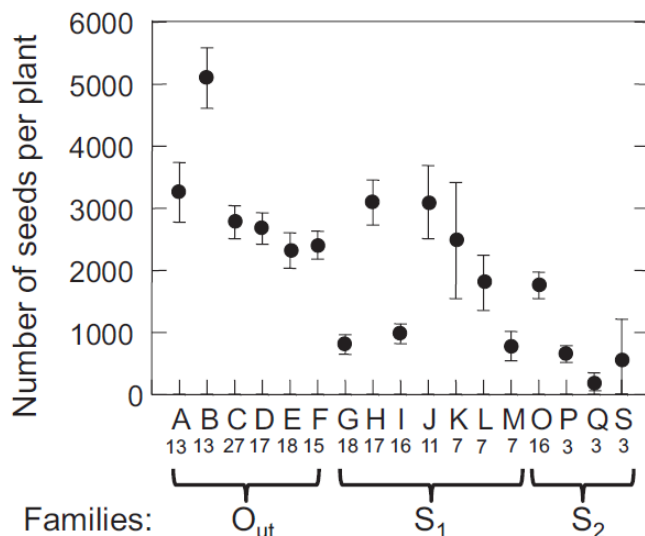


Figure 12 : Nombre de semences produites par plante et par famille de bleuet (*Cyanus segetum*). Les barres représentent l'erreur standard. Les nombres sous chaque lettre identifiant une famille représentent l'effectif de plantes par famille ([ACL30]).

Il est donc possible d'observer des individus au moins partiellement auto-compatibles dans les populations obtenues par autofécondation. Pour ces populations, la dépression de consanguinité moyenne est élevée. Toutefois il a été observé une grande variabilité parmi les familles ce qui devrait permettre à certaines familles issues de l'autofécondation de persister et donc d'envisager une évolution vers au moins une part d'autofécondation pour certaines petites populations isolées. Cette situation pourrait permettre le maintien des populations où le nombre de reproducteurs est limité dans l'agrosystème.

Ces individus pourraient donc être favorisés dans le paysage agricole actuel, ce qui pourrait engendrer des modifications du régime de reproduction et de la structuration des populations. Cependant la transition vers l'autogamie n'a pas encore été observée dans des milieux naturels. Toutefois ce phénomène est susceptible d'induire une diminution de la variabilité génétique (Young *et al.*, 1996) et pourrait ainsi contribuer à l'extinction de la population.

La modification et la fragmentation de l'habitat devraient avoir des conséquences sur la diversité génétique des populations adventices restantes. Dans ce cadre, l'étude de la diversité génétique du bleuet a été abordée ([ACL29]). Nous avons utilisé dix marqueurs microsatellites pour évaluer la diversité génétique et la structure génétique de populations contenues dans un paysage agricole du nord-est de la France (11 populations). Les dix microsatellites sont tous hautement polymorphes, *C. segetum* semble être une espèce génétiquement variable, avec des niveaux élevés de diversité dans chacun des champs étudiés. Ces résultats suggèrent que les populations de bleuet étudiées ont probablement plusieurs origines et que la variation génétique a été remaniée par des échanges de semences. Ainsi, la dispersion anthropique associée aux activités agricoles est probablement un facteur majeur de la structure de la diversité génétique dans les plantes des terres arables. Par contre la différenciation génétique entre populations est faible suggérant une dispersion locale limitée. Nous concluons que dans les zones où *C. segetum* est devenu rare, la fragmentation récente des populations peut à l'avenir entraîner une perte de la diversité génétique et avoir un impact sur le devenir de ces populations.

IV. Acquisition de connaissances sur les adventices

Chaque espèce adventice possède une combinaison de caractéristiques biologiques importantes à connaître afin de comprendre en quoi elle a été capable de se maintenir et de se développer dans certaines cultures et en situations de production. La gestion des adventices implique **une bonne connaissance des adventices (caractéristiques biologiques et physiques) et de leurs interactions avec les interventions qui se déroulent à l'échelle du système de culture**. Il est important d'étudier le comportement des espèces adventices face aux nouvelles pratiques proposées dans les systèmes de culture (semis direct, cultures de couverture, ...). En effet la dynamique des populations d'adventices est influencée par les pratiques culturales développées dans les systèmes de culture (Fried *et al.*, 2008). Les connaissances de la biologie des espèces adventices permettront d'aider à la conception et à la mise en œuvre de nouveaux systèmes de culture capables de maîtriser la présence des adventices avec moins d'herbicides ou sans avoir recours aux herbicides.

L'essentiel des adventices présentes dans les milieux cultivés sont des espèces annuelles à cycle de développement généralement court (Figure 13). Pour ces espèces, la production de semences, l'état des semences dans le stock semencier et la phase germination/levée sont très importants et conditionnent la dynamique des adventices dans les parcelles. Dans ce contexte, mes travaux se sont concentrés sur la phase germination/levée, phase cruciale pour l'installation des adventices dans les parcelles. La germination peut être influencée par la qualité des semences (taille ...), le climat et les conditions du milieu créées par les pratiques culturales. J'ai également été amené à réaliser des travaux sur les phases croissance végétative et reproduction pour quelques espèces adventices, et à acquérir des données sur des caractéristiques physiques de feuilles (réflectance).

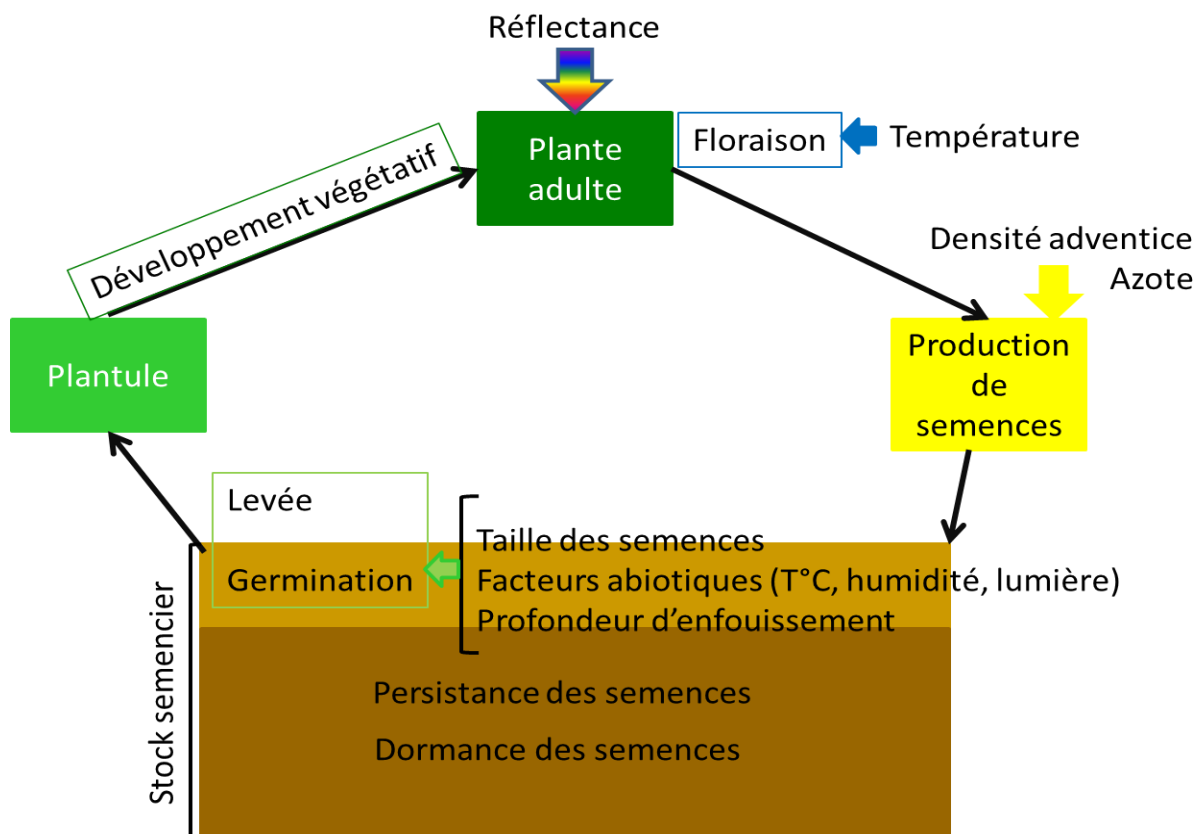


Figure 13 : Description d'un cycle annuel d'une espèce adventice avec les caractéristiques biologique et physiques étudiées et les facteurs et conditions testés en interaction avec le développement des adventices

Les adventices sont des espèces végétales capables de survivre dans les milieux cultivés donc adaptées aux perturbations plus ou moins importantes exercées dans les parcelles et donc capables de supporter la concurrence avec la culture. Chaque espèce adventice possède une combinaison de caractéristiques biologiques ([ACL37]) à connaître pour comprendre en quoi elle est capable de se maintenir et de se développer dans un agrosystème. Dans l'UMR Agroécologie, les travaux liés à cette problématique comportent des approches complémentaires, expérimentation et modélisation (modèles *AlomySys* et *FlorSys*) ; mon implication dans cette thématique concerne l'acquisition de données par l'expérimentation.

IV.1 - Persistance et dormance des semences dans le stock semencier

Le niveau du stock semencier contribue au risque de l'infestation d'une parcelle par les adventices. La connaissance de la persistance des semences enfouies d'adventices dans un champ est un élément important pour estimer le risque d'infestation des parcelles (Chancellor, 1986 ; Barralis *et al.*, 1988). La persistance des semences dépend des caractéristiques biologiques de chacune des espèces (par ex., la forme et la taille des semences, l'épaisseur des téguments de la semence,...) (Thompson *et al.*, 1993), et est influencée par les conditions environnementales (par exemple, température, teneur en eau du sol, prédation, ...). En outre, le risque d'infestation est influencé par l'état de dormance des semences présentes dans le sol, qui est contrôlé au moins en partie par des variations de température, le plus souvent avec des variations cycliques saisonnières (Baskin et Baskin, 2014 ; Gardarin et Colbach, 2015).

Des sacs de semences de bleuet (*Cyanus segetum*) ont été placés dans des paniers enterrés à 30 cm de profondeur. Tous les mois pendant quatre années, des semences ont été extraites. Les semences pourries et vides sont retirées, puis la germination des semences viables est testée. Ces travaux ont été réalisés au cours d'une thèse financée par la DGER et la région Bourgogne.

Le pourcentage de semences viables est stable au cours des dix premiers mois ce qui correspond au niveau de viabilité observée par Barralis *et al.*, 1988 (81,3% après 1 an d'enfouissement). Ensuite il diminue progressivement pour devenir inférieur à 10% après trois ans pour les deux populations testées (Figure 14) ([ACL38]). La viabilité des semences diminue de manière similaire pour les deux populations (Figure 14).

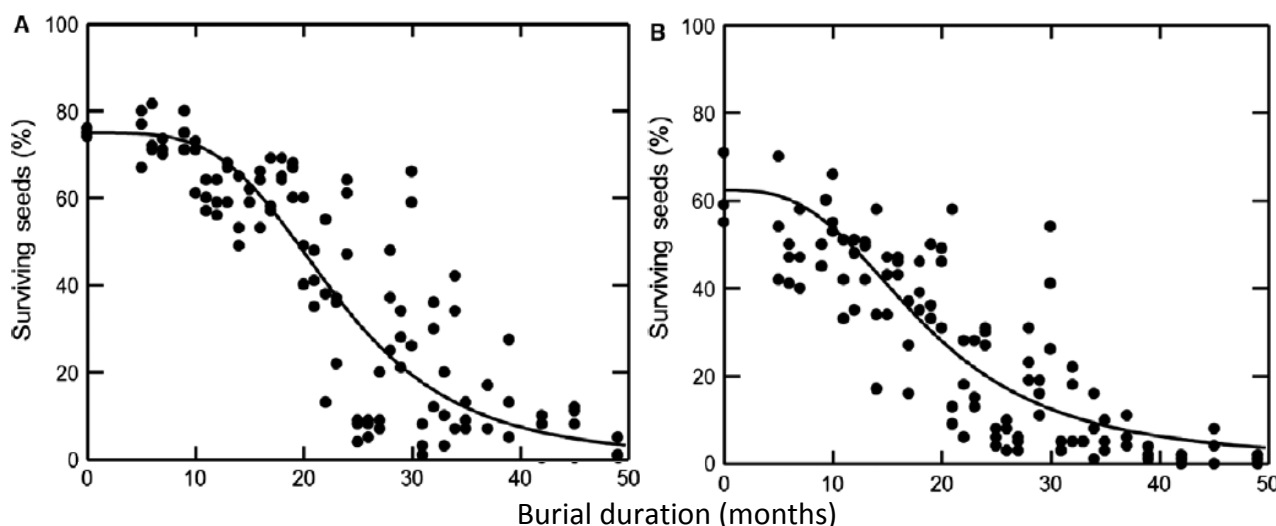


Figure 14 : Pourcentage de survie des semences de deux populations de bleuet (*Cyanus segetum*) (A : "Epagny" et B : "Herbiseed®") pendant 4 années d'enfouissement (2009 - 2012). Les semences sont placées en boîte de germination à 25/15°C avec une alternance quotidienne jour/nuit de 12 h ([ACL38]). Pour la population "Epagny", les données ont été ajustées selon l'équation $SV\% = 75 / (1 + (m / 23,3)^4)$ ($R^2 = 0,75$), avec SV, semence viable et m, la durée d'enfouissement exprimée en mois, et pour la population "Herbiseed®", la courbe est de forme similaire avec l'équation suivante $SV\% = 62 / (1 + (m / 18,8)^3)$ ($R^2 = 0,71$).

L'analyse de la dormance permet de déterminer la période potentielle de germination des semences d'une espèce adventice contenues dans le sol. Sur une période d'un an, la dormance du bleuet est minimale au mois d'octobre et maximale en avril-mai (Figure 15). Le taux de dormance n'a jamais dépassé 80% de la population, ce niveau maximal diminuant avec le temps. La dormance a fluctué de la même façon pour les deux populations, ce qui montre une réponse commune au niveau de l'espèce aux conditions environnementales ([ACL38]).

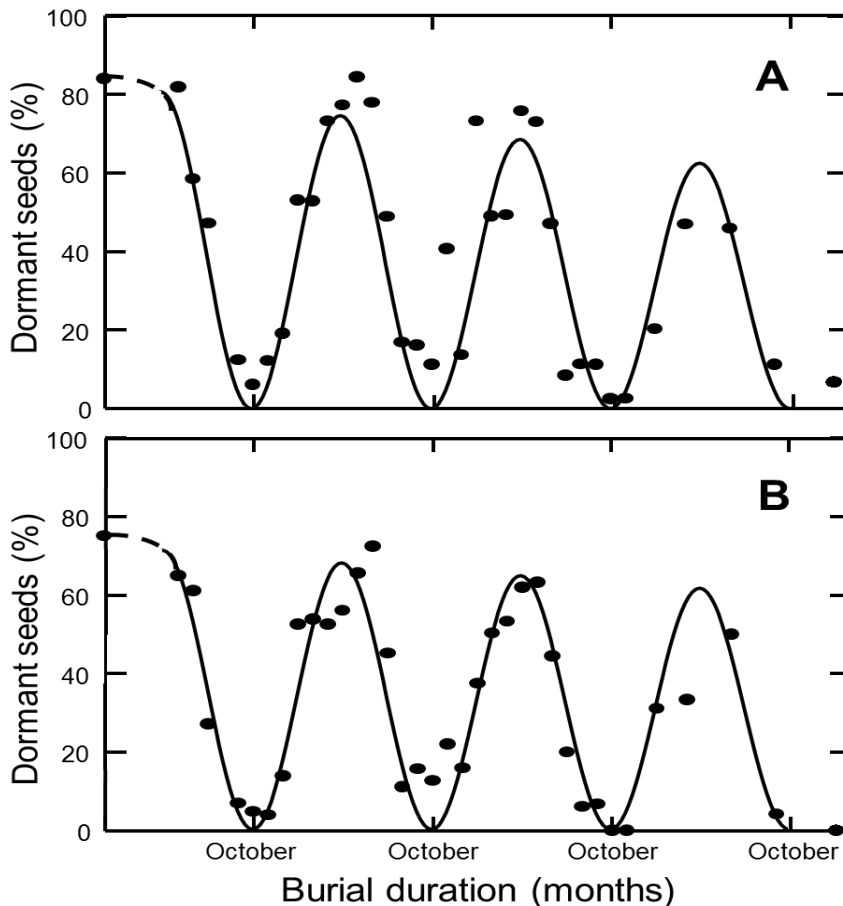


Figure 15 : Pourcentage mensuel moyen des semences dormantes au cours de quatre années (2009 - 2012) pour des semences enfouies de bleuet (*Cyanus segetum*) issues de deux populations (A : "Epagny" et B : "Herbiseed®"). Les semences sont placées en boîte de germination à 25/15°C avec une alternance quotidienne jour/nuit de 12 h ([ACL38]).

Les semences de bleuets sont caractérisées par une mortalité initiale élevée ; en effet le taux de semences viables évalué à la mise en place de l'expérimentation pour les deux populations ne dépasse pas 75%. Cette observation a déjà été faite pour *C. segetum* et d'autres espèces à germination rapide (Saatkamp *et al.*, 2009 et 2011). Dans le cas du bleuet, une baisse rapide de la viabilité de ses semences couplée avec un désherbage efficace peut amener à un épuisement rapide du stock semencier et pourrait être un des éléments d'explication de sa raréfaction dans les parcelles cultivées.

Pour conclure, la persistance des semences des adventices dans le sol et la dynamique de germination et d'émergence de leurs semences contrôlée par leur état de dormance sont des déterminants essentiels pour suivre et prévoir leur établissement dans les parcelles.

IV.2 - Phase germination / levée des adventices

La germination des semences et donc l'émergence des plantules d'adventices sont sous la dépendance de conditions environnementales (essentiellement température et humidité). Une fois ces conditions remplies, la germination et l'émergence peuvent ensuite être influencées par des caractéristiques propres aux semences, certaines conditions environnementales et des pratiques culturales. Tout d'abord la germination n'est possible que lorsque les semences sont non ou peu dormantes.

Ces travaux sur les adventices avaient pour objectifs de :

- quantifier toute une série de conditions qui influencent la germination/levée pour une large gamme d'espèces utilisées pour la prévision en particulier en modélisation ;
- renseigner sur le niveau de variabilité de la réalisation de la germination/levée pour différentes adventices afin d'évaluer le potentiel de généralité au niveau de l'espèce.

L'ensemble des expérimentations sur la phase germination / levée des adventices ont été réalisées en condition contrôlées (boîte de germination en enceinte climatique) ou semi-contrôlées en serre (bac de culture).

IV.2.1 - Exigences en température et humidité du sol pour la germination

La **température** est probablement la condition environnementale la plus importante régissant la germination (Baskin et Baskin, 2014). La température de base (T_b) pour la germination est une température caractéristique en dessous de laquelle il est considéré que la germination des semences ne peut pas se produire pour une espèce donnée (Arnold, 1959 ; Wiese et Binning, 1987). La température de base est un paramètre clé qui est pris en compte pour la prédiction et la modélisation des périodes pendant lesquelles la germination est possible (Trudgill *et al.*, 2005).

La **disponibilité de l'eau** est également une condition importante pour la germination (Doneen et MacGillivray, 1943). Les changements de la teneur en eau du sol sont directement impliqués dans les capacités d'imbibition des semences. Le potentiel hydrique de base (Ψ_b) est un autre paramètre utilisable pour prédire les périodes de germination.

Le concept de somme de température utilisant la T_b peut être étendu en intégrant la disponibilité en eau du sol pour le calcul du temps hydrothermique (Gummerson, 1986). Le temps hydrothermique est calculé avec les valeurs de T_b et Ψ_b spécifiques à chaque espèce. J'ai développé à partir de 2003 en collaboration avec Sylvie Granger (collègue AgroSup Dijon) et Antoine Gardarin (thésard dans l'UMR BGA) des expérimentations pour déterminer ces paramètres sur plusieurs espèces d'adventices abondantes dans les systèmes de culture nord-européens.

14 espèces d'adventices ont été testées. Ces expérimentations ont donné lieu à des travaux d'élèves et à plusieurs stages de recherche. Ces travaux ont conduit à la mise en place de collaboration avec des partenaires comme l'ACTA et la FNAMS, et ont bénéficié de financements (projet scientifique innovant de l'Inra et contrat de branche porté par la FNAMS).

La température de base de germination (T_b) et le potentiel hydrique de base (Ψ_b) (exprimés respectivement en °C et MPa) sont les suivants pour les espèces testées : *Amaranthus retroflexus* (8,9 et -0,95), *Ambrosia artemisiifolia* (3,6 et -1,28), *Avena fatua* (2,2 et -1,02), *Capsella bursa-pastoris* (L.) (4,5 et -0,95) (Figure 17), *Chenopodium album* (5,9 et -0,80), *Cyanus segetum* (1,5 et -1,05), *Echinochloa crus-galli* (6,2 et -1,19) (Figure 16), *Geranium dissectum* (0,6 et -3,31), *Persicaria lapathifolia* (5,8 et -1,55), *Picris echioides* (5,2 et -0,79), *Senecio vulgaris* (2,5 et -1,23), *Setaria pumila* (8,6 et -0,75), *Solanum nigrum* (11,6 et -0,89) *Tripleurospermum inodorum* (2,0 et -0,75) et *Veronica hederifolia* (0,2 et -1,67)

([ACL25], [ACL38]).

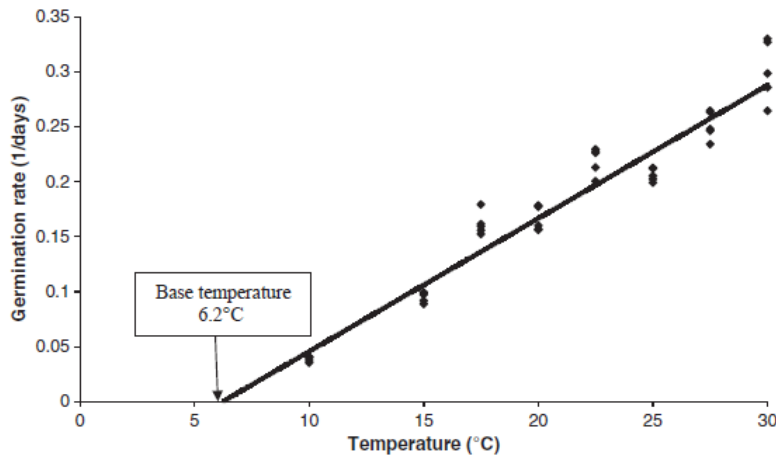


Figure 16 : Effet de la température ($T^{\circ}\text{C}$) sur la vitesse de germination (GR) du panic pied de coq (*Echinochloa crus-galli*). Les symboles correspondent aux valeurs mesurées et la droite de régression permet d'estimer la température de base de germination ($\text{GR} = 0,0121 * T^{\circ}\text{C} - 0,075$, $r^2 = 0,97$) ([ACL25]).

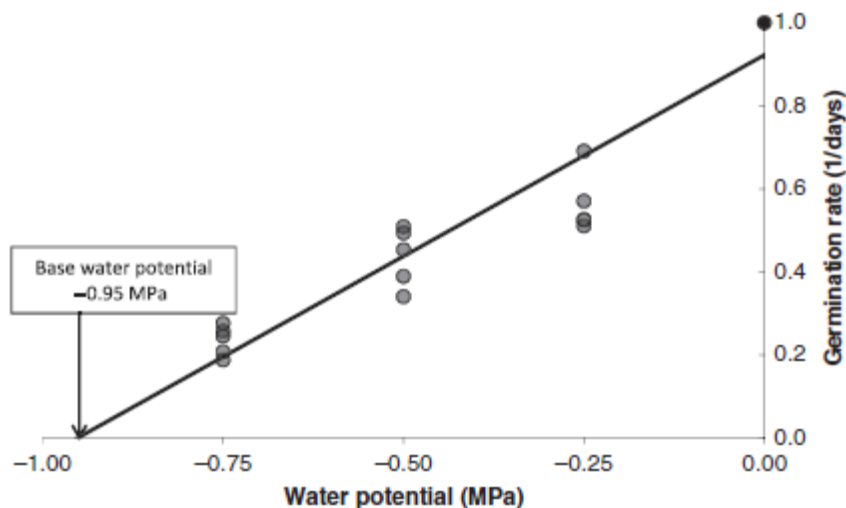


Figure 17 : Effet du potentiel hydrique (Ψ) sur la vitesse de germination (GR) de la capselle bourse à pasteur (*Capsella bursa-pastoris*). Les symboles correspondent aux valeurs mesurées et la droite de régression permet d'estimer le potentiel hydrique de base de germination ($\text{GR} = 0,96 * \Psi - 0,923$, $r^2 = 0,91$) ([ACL25]).

Ces exigences en température et humidité sont-elles identiques pour une même espèce quelle que soit son origine ? Ce travail a été réalisé pour la température de base de germination qui a été estimée sur plusieurs populations de plusieurs espèces d'adventices (*A. retroflexus*, *C. album*, *C. segetum*, *P. echioides*, *S. nigrum*). Des populations d'origine variée (lieu et année) ont été testées. Les résultats sont variables d'une espèce à une autre (Tableau 5).

La majorité des espèces présentent des valeurs de température de base homogènes en intraspécifique quelle que soit leur période de récolte et leur lieu de récolte en France (Tableau 5). Pour *C. album*, les valeurs estimées pour les deux populations françaises sont proches de la valeur (6°C) obtenue pour une population récoltée aux Etats-Unis (Wiese et Binning, 1987). Par contre la température de base pour *A. retroflexus* est dépendante de la zone géographique de collecte de la population avec $8,7$ à $8,9^{\circ}\text{C}$

pour les populations récoltées à Dijon, 10°C (Wisconsin, USA (Wiese et Binning, 1987)), 10°C (Illinois, USA (Forcella, 1998)), 11,6°C (centre de l'Italie (Benvenuti et Macchia, 1993)) et 12,1°C (centre de l'Italie) et 12,3°C (Nord de l'Italie) (Masin *et al.*, 2010). Le même constat a été fait pour la morelle noire (*S. nigrum*) dont la température de base est différente entre la population israélienne et les deux populations françaises (Tableau 5). Il a été observé qu'au sein de certaines espèces de la variabilité peut s'exprimer et qu'elle devrait permettre à ces espèces de s'adapter en fonction des conditions environnementales existantes dans différentes zones géographiques.

Tableau 5 : Température de base de germination (\pm intervalle de confiance) de différentes populations d'espèces d'adventice ([ACL25]).

| Espèce | Origine | Date de collecte | Base de température de germination (°C) |
|-------------------------------|-------------------|------------------|---|
| <i>Amaranthus retroflexus</i> | F-Dijon | 2001 | 8,7 \pm 0,99 |
| | F-Dijon | 2002 | 8,9 \pm 1,08 |
| <i>Chenopodium album</i> | F-Tarn et Garonne | 2004 | 5,7 \pm 0,81 |
| <i>Chenopodium album</i> | F-Dijon | 2005 | 5,9 \pm 0,48 |
| <i>Cyanus segetum</i> | Herbiseed | 2006 | 1,9 \pm 0,58 |
| <i>Cyanus segetum</i> | F-Dijon | 2007 | 1,1 \pm 0,72 |
| <i>Picris echioides</i> | F-Dijon | 2006 | 5,2 \pm 0,79 |
| <i>Picris echioides</i> | F-Lourdes | 2006 | 6,3 \pm 0,88 |
| <i>Solanum nigrum</i> | F-Tarn et Garonne | 2004 | 11,5 \pm 0,77 |
| <i>Solanum nigrum</i> | F-Dijon | 2005 | 11,6 \pm 0,65 |
| <i>Solanum nigrum</i> | Israël | 2006 | 9,0 \pm 0,77 |

Les résultats obtenus ont contribué aux travaux développés lors de la thèse d'A. Gardarin ([ACL19]) ; en effet il a été observé que la valeur de la température de base est liée à la saison de l'émergence de l'espèce. En partant de ce constat et avec le fait que la température de base de germination est un paramètre dont la mesure est fastidieuse, il a été établi une corrélation entre la température de base de germination des espèces et la date moyenne de levée au champ des différentes espèces, information locale collectée grâce à la consultation d'experts en malherbologie. La construction de cette corrélation a permis d'obtenir des valeurs de température de base pour de nombreuses espèces en valorisant un savoir d'experts et sans devoir mettre en place de longues expérimentations dédiées.

IV.2.2 - Effet de conditions environnementales sur la germination

L'effet de la photopériode couplé à l'influence de la température a été étudié sur la germination de *Cyanus segetum*. L'objectif de cette étude était de déterminer qu'elle était la période (la saison) la plus adaptée à son émergence dans les parcelles ([ACL38]).

Des semences de deux populations ("Epagny" et "Herbiseeds®") ont été testées selon quatre modalités de température (20°C jour/10°C nuit; 15°C jour/10°C nuit; 15°C jour/5°C nuit; 10°C jour/5°C nuit) avec deux régimes de photopériode, une mimant le printemps (10 h de nuit et 14 h de jour) et l'autre l'automne (14 h de nuit et 10 h de jour), et à l'obscurité. Ces travaux ont bénéficié d'un financement ACTA dans le cadre du RMT Florad.

Quelles que soient les conditions de température et de photopériode testées, 62 à 81,6% des semences de *C. segetum* ont germé pour les deux populations testées (Tableau 6). Le pourcentage maximal de germination a été obtenu pour les deux populations avec une photopériode de type automnal pour

"Épagny" (73,2%) avec l'alternance de température 15°C le jour et 10°C la nuit et pour "Herbiseed®" (81,6%) avec l'alternance de température 15°C le jour et 5°C la nuit, combinaison de températures en adéquation avec des températures automnales.

Par contre la température a influencé la vitesse de germination; les combinaisons de températures, 10°C le jour et 5°C la nuit, et 15°C le jour et 5°C la nuit, réduisent significativement la vitesse de germination pour les deux populations (Tableau 6).

Tableau 6 : Pourcentage de germination et vitesse de germination de deux populations de bleuet (*Cyanus segetum*) ("Épagny" et "Herbiseed®") pour deux photopériodes (10 h jour/14 h nuit et 14 h jour/10 h nuit) et pour quatre combinaisons de températures (10°C/5°C, 15°C/5°C, 15°C/10°C et 20°C/10°C) ([ACL38]). Pour chaque population, les valeurs avec des lettres différentes sont significativement différentes à $P < 0,05$.

| Photopériode | "Épagny" | | "Herbiseed®" | |
|-----------------------|---|----------------|----------------|-----------------|
| | 10 h/14 h | 14 h/10 h | 10 h/14 h | 14 h/10 h |
| Température jour/nuit | % de germination | | | |
| 10°C/5°C | 62,0 ± 1,2 a | 66,8 ± 4,9 a | 78,4 ± 4,8 a | 73,8 ± 7,7 a |
| 15°C/5°C | 69,2 ± 5,6 a | 72,4 ± 5,6 a | 81,6 ± 4,8 a | 75,4 ± 4,7 a |
| 15°C/10°C | 73,2 ± 6,1 a | 68,2 ± 1,3 a | 73,6 ± 7,5 a | 68,4 ± 9,3 a |
| 20°C/10°C | 68,8 ± 5,4 a | 63,0 ± 8,3 a | 69,0 ± 6,3 a | 66,6 ± 5,7 a |
| | Vitesse de germination (day ⁻¹) | | | |
| 10°C/5°C | 0,13 ± 0,02 a | 0,15 ± 0,005 a | 0,15 ± 0,007 a | 0,18 ± 0,008 a |
| 15°C/5°C | 0,16 ± 0,014 b | 0,24 ± 0,004 b | 0,19 ± 0,017 b | 0,28 ± 0,016 b |
| 15°C/10°C | 0,27 ± 0,016 c | 0,32 ± 0,022 c | 0,32 ± 0,010 c | 0,32 ± 0,053 bc |
| 20°C/10°C | 0,28 ± 0,023 c | 0,32 ± 0,064 c | 0,33 ± 0,012 c | 0,39 ± 0,084 c |

IV.2.3 - Effet de la qualité des semences sur la germination

Des caractéristiques des semences telles que la taille des semences peuvent avoir un impact sur la germination et la levée des plantes (Turnbull *et al.*, 2004). La variabilité du poids des semences est souvent citée comme un trait favorable pour l'installation et la colonisation dans un milieu permettant aux espèces de faire face à différentes conditions environnementales (Banovetz et Scheiner, 1994). Alors que les semences plus légères sont souvent associées à une plus grande dispersion et à une plus grande persistance dans le stock semencier (Harper *et al.*, 1970), les semences plus lourdes sont mieux adaptées aux conditions concurrentielles (Fenner et Thompson, 2005). Cette caractéristique biologique est connue pour être très variable pour *Ambrosia artemisiifolia* (Washitani et Nishiyama, 1992).

Pour la population d'ambrosie étudiée, le poids des semences variaient entre 1,2 à 7,7 mg avec un poids moyen de 4,08 mg. Les semences ont été réparties en cinq classes de poids d'importance identique (LL : semence légère, ML : semence moyennement légère, MM : semence de taille moyenne, MH : semence moyennement lourde et HH : semence lourde). Les tests ont été menés en boîte de Petri avec 100 semences par boîte avec cinq répétitions par modalité. Ces travaux ont bénéficié d'un financement ACTA dans le cadre du RMT Florad.

Le poids des semences de la population testée d'ambrosie à feuille d'armoise n'a pas d'effet sur son niveau de germination et la vitesse de germination ([ACL22]).

Toutes les espèces adventices ne se comportent pas de la sorte ; il est donc impossible de généraliser l'effet du poids des semences sur la germination à l'ensemble des espèces adventices (Baskin et Baskin, 2014).

IV.2.4 - Effet de la position des semences dans le sol sur la germination/levée

La relation entre la profondeur d'enfouissement des semences et le succès de l'émergence des adventices a fait l'objet de nombreux travaux (voir Gardarin *et al.*, 2009). Par contre, l'aptitude des adventices à s'implanter à partir de semences posées sur la surface du sol a été moins étudiée (Jensen, 2009) dans la mesure où la quasi-totalité des parcelles agricoles fait généralement l'objet d'un travail du sol (superficiel ou profond) qui positionne les semences à des distances plus ou moins importantes de la surface du sol.

IV.2.4.1 - Emergence dans le contexte de non travail du sol et de présence de couvert végétal

Le développement de techniques telles que du travail du sol très simplifié voire le semis direct, pour l'agriculture de conservation par exemple (Triplett et Warren, 2008), met en avant l'intérêt de développer des connaissances sur l'aptitude des espèces adventices à débiter leur cycle à partir de semences posées à la surface du sol. Cette évolution des systèmes de culture intègre souvent une autre pratique, la mise en place de couverts végétaux permanent ou non permanent.

Des expérimentations avec 14 espèces d'adventices ont été mises en place en serre pour tester l'impact de la position de la semence (surface (S) et enfouie à 0,5 cm (B)) et la présence d'un couvert (C- (pas de couvert) et C (couvert de ray-grass)) sur leur capacité à émerger. Ce travail développé avec S. Cordeau, chercheur Inra, a été financé par le RMT Florad.

Globalement le pourcentage d'émergence est inférieur de 10,3% pour les semences présentes à la surface du sol (Figure 18) ([ACL35]). De plus une autre tendance est observée ; généralement les semences non enterrées montrent une plus grande variance dans leur capacité à émerger (par exemple *Anisanthia sterilis*). Une baisse significative d'émergence avec des semences non enterrées est observée pour cinq espèces (*Ambrosia artemisiifolia* (-22,5% par rapport aux graines enterrées), *Anagallis arvensis* (-25,5%), *Anisanthia sterilis* (-28,6%), *Cyanus segetum* (-12,7%) et *Euphorbia helioscopia* (-92,7%)). Pour d'autres espèces testées (*Alopecurus myosuroides*, *Veronica persica*, ...), il n'a pas été observé d'effet de la position des semences dans le sol (en surface ou enfouies) sur la levée.

Avec les mêmes 14 espèces d'adventices, nous avons testé l'effet de la présence d'un couvert sur leur émergence. L'effet est également très dépendant de l'espèce adventice. Cependant ce ne sont pas nécessairement les mêmes espèces qui sont affectées par la position de la semence dans le sol et la présence d'un couvert. Globalement la présence d'une couverture végétale a réduit, en moyenne, l'émergence de 9,5%. Cinq espèces (*A. myosuroides* (-11,9% par rapport à l'émergence sans couverture), *Capsella bursa-pastoris* (-13,3%), *Sonchus asper* (-8,1%), *V. persica* (-21,9%) et *Vulpia myuros* (-17,5%) sont significativement affectées par la présence d'une couverture (Figure 18).

Parmi les 14 espèces d'adventices testées, quatre espèces (*Geranium dissectum*, *Lamium purpureum*, *Poa annua*, *Viola arvensis*) ne sont affectées ni par la position de la semence au niveau du sol ni par la présence ou pas d'un couvert végétal (Figure 18).

Parmi les 14 espèces précédemment étudiées, huit ont été choisies pour étudier l'effet supplémentaire d'un stress hydrique sur la germination ; quatre espèces d'adventices annuelles fréquemment trouvées (*A. sterilis*, *V. myuros*, *S. asper*, *V. persica*) et quatre peu fréquemment observées (*A. myosuroides*, *P. annua*, *C. segetum*, *C. bursa-pastoris*) dans les champs mettant en œuvre des pratiques de non travail du sol avec couvert permanent.

L'effet du stress hydrique amplifie l'impact négatif du non enfouissement des semences et de la présence

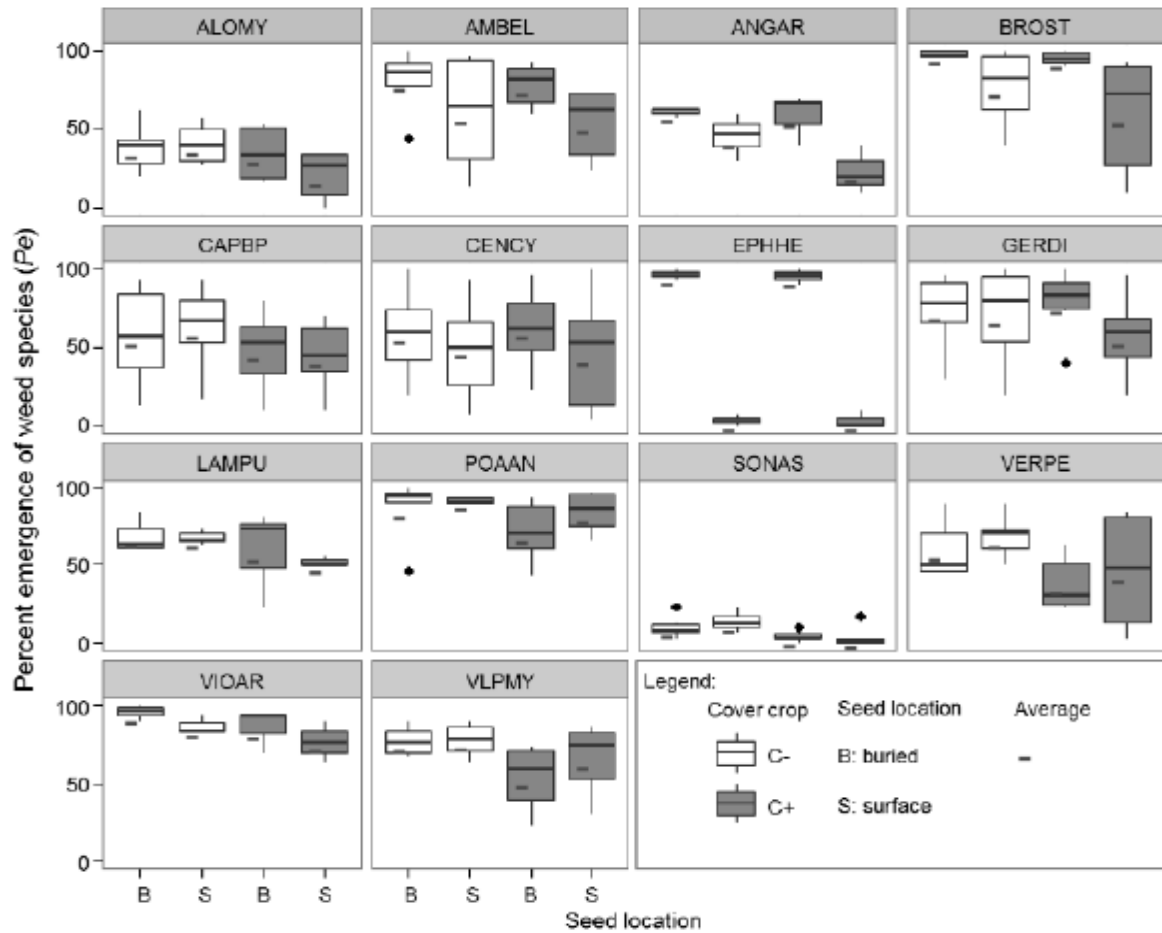


Figure 18 : Effet de la position des semences (B : enfouies, S : surface) et de la présence (C+) ou absence (C-) d'un couvert de ray-grass sur l'émergence de 14 espèces d'adventices (ALOMY : *Alopecurus myosuroides*, AMBEL : *Ambrosia artemisiifolia*, ANGAR : *Anagallis arvensis*, BROST : *Anisanthia sterilis*, CAPBP : *Capsella bursa-pastoris*, CENCY : *Cyanus segetum* , EPHHE : *Euphorbia helioscopia*, GERDI : *Geranium dissectum*, LAMPU : *Lamium purpureum*, POAAN : *Poa annua*, SONAS : *Sonchus asper*, VERPE : *Veronica persica* , VIOAR : *Viola arvensis*,VLPMY : *Vulpia myuros*) ([ACL35]).

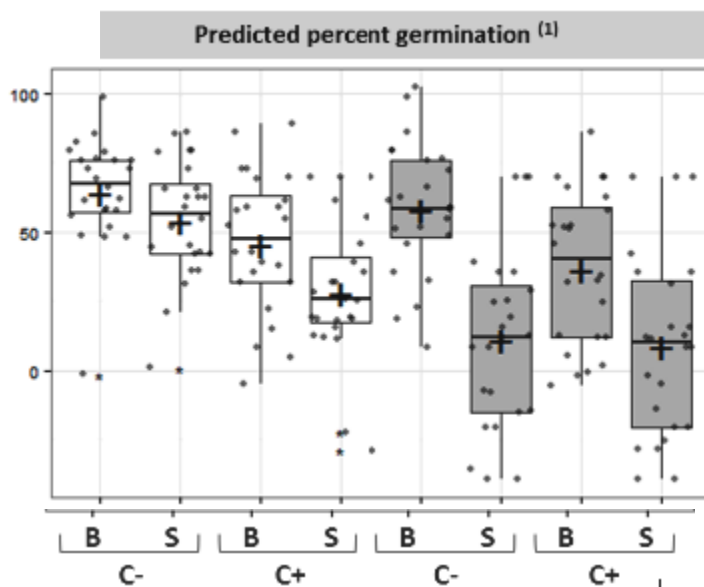


Figure 19 : Effet du stress hydrique (boite blanche : sans stress hydrique, et boite grise : avec stress hydrique), de la position des semences (B : enfouies, S : surface) et de la présence (C+) ou absence (C-) d'un couvert de ray-grass sur l'émergence moyen de huit espèces d'adventices ([ACL39]).

d'un couvert végétal sur l'émergence des adventices (Figure 19). Le stress hydrique réduit globalement de 20% l'émergence des adventices (pour sept des huit espèces). L'effet est d'autant plus marqué que les semences sont à la surface du sol, 55% de germination en moyenne pour les semences enfouies sans stress hydrique contre 10% de germination en moyenne pour les semences en surface avec stress hydrique ([ACL39]).

IV.1.2.4.2 - Effet de l'enfouissement des semences

Il se pose également la question du comportement des semences en fonction du niveau d'enfouissement quant à leur germination et leur capacité à émerger une fois germée. Ce comportement a été étudié pour deux espèces adventices (*Cyanus segetum* et *Ambrosia artemisiifolia*) et pour l'une d'entre elles, l'ambrosie, la variable, poids des semences, a été ajoutée à l'effet enfouissement. Il est généralement observé une diminution du pourcentage de germination des semences avec la profondeur d'enfouissement (Bliss et Smith, 1985).

Les semences de bleuet (deux populations "Epagny" et "Herbiseeds®") ont été placées à six profondeurs (0, 0,5, 2, 4, 6 et 8 cm) dans des bacs remplis d'un mélange terre/sable. Chaque traitement de profondeur a été répété cinq fois et les bacs contenant chacun 26 semences étaient placés en serre. Ces travaux ont bénéficié d'un financement Inra (projet scientifique innovant département EA).

La germination des deux populations de *C. segetum* est significativement modifiée par la profondeur de l'enfouissement ([ACL38]). Pour "Epagny", une tendance de réduction de germination est observée à partir de 0,5 cm. En revanche, une forte réduction de la germination à partir de 2 cm de profondeur est observée pour la population "Herbiseed" (Figure 20 A).

L'émergence pour les deux populations est la plus élevée à 0,5 cm de profondeur et diminue significativement à partir de 2 cm de profondeur (Figure 20 B). Aucune émergence n'est obtenue pour les semences des deux populations enterrées à plus de 8 cm. En outre, l'émergence des deux populations est inférieure de l'ordre de 10% pour les semences posées à la surface du sol par rapport à celle se trouvant à 0,5 cm de profondeur (Figure 20 B).

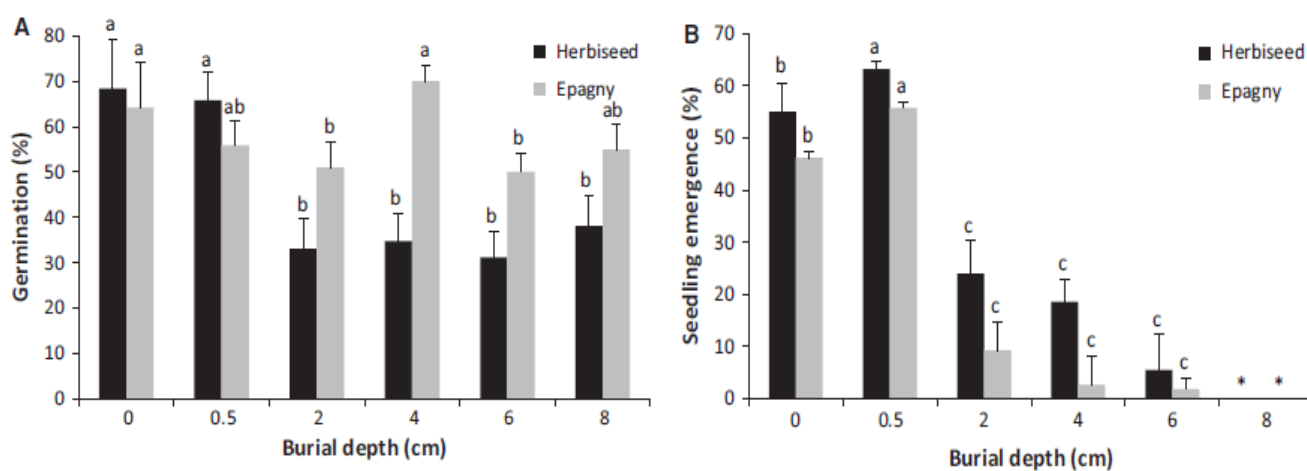


Figure 20 : Germination (A) et émergence (B) des semences de deux populations de bleuet (*Cyanus segetum*) ("Epagny" et "Herbiseed"). Les barres d'histogramme avec des lettres différentes sont significativement différents à p < 0,05. * signifie aucune émergence ([ACL38]).

Ce travail s'est prolongé par l'étude de l'effet de l'enfouissement sur la germination et l'émergence d'*A. artemisiifolia*, espèce pour laquelle une forte variabilité de la taille des semences est connue. Les travaux sur cette espèce ont permis d'étudier l'effet de l'enfouissement et de la taille des semences sur la

germination et l'émergence.

Les semences d'*A. artemisiifolia* ont été placées à six profondeurs (0, 2, 4, 8, 10 et 12 cm) dans des bacs remplis d'un mélange terre/sable. Pour chaque profondeur testée, les semences ont été réparties en trois classes de poids (L : légère, M : moyenne et H : lourde). Ces travaux ont bénéficié d'un financement Inra (projet scientifique innovant département EA).

À mesure que la profondeur d'enfouissement augmente, la germination et l'émergence diminuent (Figure 21) ([ACL22]). De plus la taille des semences interagit avec la profondeur d'enfouissement ; en effet l'émergence des semences de petite taille (L) est significativement réduite dès 2 cm de profondeur, et seules les semences de plus grande taille (H) sont capables d'émerger jusqu'à 8 cm (Figure 21 b).

Une diminution de l'émergence due à l'augmentation de la profondeur d'enfouissement est rapportée pour plusieurs autres espèces adventices (Benvenuti *et al.*, 2001) confirmant les résultats obtenus pour le bleuet et l'ambrosie. Il apparaît important de tenir compte de variabilité intra-spécifique de la taille des semences et de la répartition des semences le long du profil de sol pour prévoir l'installation et la démographie d'une espèce adventice.

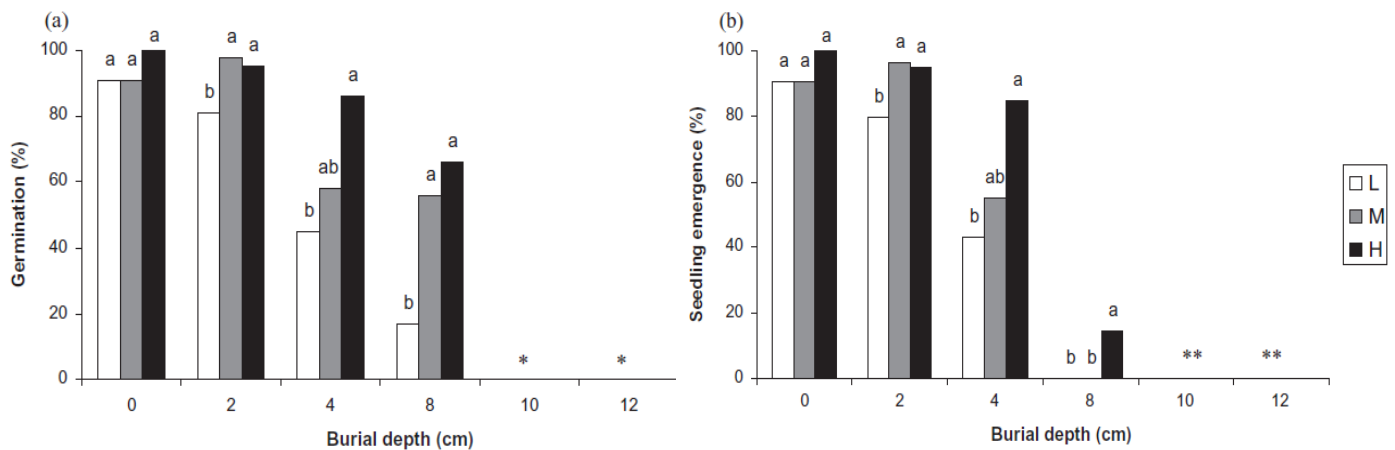


Figure 21 : Germination (A) et émergence (B) des semences d'ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*) (population Pluvet) pour trois classes de poids de semence (L : semence légère, M : semence de taille moyenne, H : semence lourde) à plusieurs profondeurs d'enfouissement. Les barres d'historgramme avec des lettres différentes sont significativement différentes à $p < 0,05$. * signifie aucune germination et ** aucune émergence ([ACL22]).

IV.3 - Phase Floraison – Reproduction

Une fois émergée, les adventices annuelles doivent s'installer dans l'agrosystème et réaliser l'ensemble de leur cycle de développement pour assurer leur maintien dans ce milieu. Pour ces espèces, la floraison est une période importante du cycle de développement. La réussite de cette phase conditionne la production des semences et donc leur dynamique dans les parcelles. La mise en place de la floraison peut être influencée par des paramètres environnementaux tels que la température (vernalisation), la disponibilité en azote, l'accès à la lumière, la longueur du jour (photopériode), ...

Différents paramètres environnementaux ont été testés sur le suivi de la phase de développement reproductif du vulpin (*Alopecurus myosuroides*). Ces études ont été réalisées en conditions semi-contrôlées (serre) et au champ. Des situations contrastées de date d'émergence et de disponibilités en ressources ont été créées. Ces travaux ont bénéficié d'un financement Inra, projet scientifique innovant.

L'action combinée du rayonnement global et de la photopériode a une influence sur les valeurs de phyllochrone (Chauvel *et al.*, 2000); ceci permet généralement une adaptation de la date de floraison à la culture dans laquelle le vulpin est présent (Tableau 7). L'espèce est donc capable de boucler son cycle et de disséminer des semences aussi bien dans les cultures d'hiver que dans certaines cultures de printemps précoces grâce à un raccourcissement de son cycle végétatif. Par contre la capacité de développement du vulpin est limitée par son incapacité à fleurir (perte de l'induction liée à la vernalisation) dans les situations de germination et d'installation très tardives au printemps (Tableau 7).

Une solution possible pour certaines espèces adventices consiste à privilégier un cycle de développement, qui soit proche de celui de la culture avec laquelle elles se développent, permettant ainsi la production d'au moins une partie des semences avant la récolte de la plante cultivée.

Tableau 7 : Effet de la date de semis sur la floraison du vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*) (base de température de 0°C) ([ACL13]).

| Date d'émergence | Somme de température pour atteindre le stade floraison | Date de floraison (stade anthèse) |
|------------------|--|-----------------------------------|
| 20 août 1996 | 1955 | Fin avril |
| 30 sept. 1996 | 1296 | Fin avril |
| 31 oct. 1996 | 1012 | Fin avril |
| 12 fév. 1997 | 949 | De mi à fin mai |
| 02 mars 1997 | 829 | De mi à fin mai |
| 15 mars 1997 | 922 | Début juin |
| 15 avril 1997 | 1244 | Début juin |
| 01 mai 1997 | 1456 | De mi à fin juin |
| 15 mai 1997 | pas de floraison | pas de floraison |
| 02 juin 1997 | pas de floraison | pas de floraison |

L'expérimentation sur l'étude des effets des facteurs limitants, lumière et azote, était conçue avec deux niveaux de densité (faible et forte densité de vulpin) et deux niveaux d'azote (faible apport et fort apport d'azote). L'augmentation de la densité réduit le nombre d'inflorescences matures par plante, le nombre de semences par plante et le poids des caryopses produits (Tableau 8) ([ACL13]).

Tableau 8 : Effet des différents traitements sur la reproduction du vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*) (N1 : 1 meq. N L, N2 : 7,5 meq. N L ; D1 : 40 pots m² ; D2 : 160 pots m²) ([ACL13]). Les valeurs suivies d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de 5%.

| Traitement | Nombre plantes | Nombre inflorescences matures/plante | Nombre de semences/plante | Poids de 100 caryopses (mg) | % de viabilité |
|------------|----------------|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------|
| N1D1 | 15 | 29,3 (b) | 5160 (bc) | 165,8 (b) | 88,3 (a) |
| N1D2 | 15 | 19,5 (a) | 3116 (a) | 148,3 (a) | 85,2 (a) |
| N2D1 | 15 | 33,8 (b) | 5905 (c) | 167,2 (b) | 87,0 (a) |
| N2D2 | 15 | 22,6 (a) | 4924 (ab) | 142,2 (a) | 87,6 (a) |

L'augmentation de la disponibilité en azote pour une densité donnée ne permet pas de compenser l'effet de la densité pour ces différents paramètres de développement (Tableau 8). La compétition intraspécifique affecte fortement différentes composantes de reproduction du vulpin. On peut toutefois noter que la plante est capable d'assurer une production de semences y compris dans les situations de compétition les plus stressantes.

Comme on vient de le voir, la floraison peut être influencée par différentes conditions environnementales. L'induction de la floraison du bleuet (*Cyanus segetum*) est essentiellement déterminée par la durée du jour (photopériode) (Thomas et Vince-Prue, 1997), ce qui signifie que les fleurs sont initiées environ à la même période chaque année, indépendamment de la température. Dans un contexte de changement climatique, la variabilité de la date de floraison de *C. segetum* a été étudiée avec différentes populations récoltées le long d'un gradient latitudinal (latitude de 45° à 55°).

Après émergence, les plantes sont transférées dans des enceintes climatiques, deux à température constante (15°C ou 25°C) et une à 15°C avec une période de vernalisation de trois semaines à 4°C. Le nombre de jours entre l'émergence et la première floraison a été noté pour chaque plante, puis converti en la somme des degrés-jour (GDD) en utilisant 1°C comme température de base.

L'exigence de jours longs a été confirmée pour *C. segetum* ([ACL34]). Par contre les exigences de vernalisation ne sont pas strictes pour *C. segetum* ; la proportion de plantes qui n'étaient pas sensibles ou qui ont répondu strictement ou faiblement à la vernalisation variait d'une population à l'autre. Globalement le pourcentage de plantes produisant des fleurs est globalement élevé quelle que soit la modalité ; 94,4% de plantes fleuries avec vernalisation, et 84,4% sans vernalisation. Toutefois la vernalisation a permis une floraison plus précoce pour toutes les populations (Tableau 9). La somme des degrés-jour (GDD) pour la première floraison à 15°C est de 1344°C jour avec vernalisation et de 2072°C jour à 15°C sans vernalisation, toute population confondue. La somme des GDD est globalement similaire pour les deux températures sans vernalisation : 2072°C jour à 15°C et 2134°C jour à 25°C. La température de 25°C n'a eu aucun effet sur la somme de GDD sauf pour une population présente en zone de montagne (Grand Paradis). La somme de GDD requise pour la floraison augmente modérément avec la latitude à 15°C sans vernalisation. C'était aussi vrai pour les populations à 15°C avec vernalisation, sans tenir compte des populations de montagne (Gap et Grand Paradis).

Tableau 9 : Origine des populations du bleuet (*Cyanus segetum*) avec leur latitude, somme de degrés-jour moyenne pour la floraison pour les trois modalités (15°C avec ou sans vernalisation et 25°C sans vernalisation) ([ACL34]). Pour chaque colonne, les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes à $p < 0,05$.

| Localisation | Latitude | Somme de degrés-jour pour la floraison | | |
|------------------------|----------|--|-------------------------|-------------------------|
| | | 15°C avec vernalisation | 15°C sans vernalisation | 25°C sans vernalisation |
| Gap (France) | 44°55 | 1332 ± 20 ab | 1944 ± 51 bc | 1882 ± 118 b |
| Grand Paradis (Italie) | 45+58 | 1519 ± 35 a | 2044 ± 102 bc | 2642 ± 164 a |
| Dijon (France) | 47°48 | 1127 ± 23 c | 1874 ± 38 c | 1825 ± 90 b |
| Troyes (France) | 48°22 | 1266 ± 13 b | 2143 ± 42 ab | 2055 ± 113 b |
| Krakow (Pologne) | 50°07 | 1312 ± 21 b | 2140 ± 63 ab | 2280 ± 164 ab |
| Seta (Lituanie) | 55°26 | 1446 ± 21 a | 2286 ± 53 a | 2118 ± 125 b |

L'évolution des conditions climatiques pourrait potentiellement induire des modifications de

comportement d'espèces végétales. Certaines espèces sont affectées par ces évolutions, en particulier par l'élévation moyenne des températures (Craufurd et Wheeler, 2009). Par exemple, au cours de la dernière décennie, les dates de récolte du blé ont été avancées de quatre jours en Allemagne (Estrella *et al.*, 2007) et d'une semaine dans plusieurs régions en France (Gouache *et al.*, 2012). En conséquence, des espèces comme *C. segetum*, si elle n'évolue pas, pourraient voir leur durée de floraison réduite. Ceci serait à l'origine d'une baisse de la production de semences de bleuet ce qui pourrait accentuer son déclin. Bien que nous ayons détecté une faible différenciation génétique parmi différentes populations de *C. segetum* ([ACL29]; Petit *et al.*, 2015a), il est possible que les populations aient une certaine réserve de variabilité génétique, comme celle observée ici pour la vernalisation, ce qui pourrait permettre une adaptation locale. Des preuves expérimentales récentes suggèrent qu'un changement de floraison s'est produit dans des populations du Nord de la France échantillonnées à 18 ans d'intervalle, cette évolution a été attribuée à la sélection naturelle (Thomann *et al.*, 2015).

L'ensemble des expérimentations réalisées sur la reproduction des adventices (ici deux espèces, le vulpin et le bleuet) suggère que certaines conditions environnementales sont susceptibles d'impacter leur production de semences et donc d'influencer la présence et la dynamique des adventices dans l'agrosystème.

IV.4 - La réflectance des feuilles d'adventices

L'agriculture de précision consiste à appliquer "*la bonne dose au bon endroit et au bon moment*" (Zwaenepoel et Le Bars, 1997). L'objectif est donc bien de réduire la quantité d'herbicides appliquée en la limitant aux seules zones de la parcelle où les adventices sont présentes. Pour mettre en place une telle agriculture, il est nécessaire de détecter et localiser les adventices dans une parcelle. Les travaux développés dans le cadre de cette thématique ont consisté au développement des méthodes de détection des adventices. Cette thématique a été mise en place avec plusieurs collègues physiciens d'AgroSup qui sont maintenant intégrés dans l'UMR Agroécologie (équipe Agriculture de Précision dans le pôle GestAd).

Les premiers travaux étaient axés sur un algorithme de détection des lignes de semis permettant de détecter les cultures. Cette méthode a permis de détecter très précisément les cultures ainsi que les adventices présentes dans l'inter-rang. En revanche, les adventices présentes dans la ligne de semis ne sont pas repérées et sont identifiées comme des cultures. En complément à cette méthode, une autre approche a été envisagée pour détecter les adventices sur le rang de culture ; c'est l'utilisation d'une caractéristique spectrale des végétaux, le spectre de réflectance. La réflectance se définit comme le rapport entre la réflexion de la plante et la réflexion d'une référence (surface blanche qui réfléchit totalement la lumière incidente).

Une classification de plusieurs adventices appartenant à différentes familles botaniques via leur réflectance a été menée en laboratoire en utilisant un spectromètre haute résolution (ocean optics - AVS2000).

Pour l'ensemble des espèces, le spectre de réflectance présente une forte réflectance dans l'infra-rouge contrairement au visible ([AC09], [AC12]). Les résultats obtenus en laboratoire avec le spectromètre révèlent qu'il faut privilégier des filtres interférentiels situés préférentiellement dans le domaine spectral du vert (550 nm), du rouge (entre 700 nm et 790 nm) et aussi de l'infra-rouge (800-1000 nm). A l'issue de

l'analyse des spectres, nous avons pu réduire l'espace des variables à 18 longueurs d'onde, essentiellement localisées dans le rouge (entre 690 nm et 730 nm), là où la variabilité de la réflectance est maximale. L'allure des spectres permet de discriminer systématiquement les monocotylédones des dicotylédones (Figure 22). La classification des spectres selon le groupe d'appartenance puis selon la famille d'appartenance des adventices (Asteraceae, Scrophulariaceae, Brassicaceae et Poaceae) ont donné des résultats (plus de 87% des spectres bien classés) prometteur pour optimiser les traitements d'images concernant l'imageur multi-spectral (Figure 22).

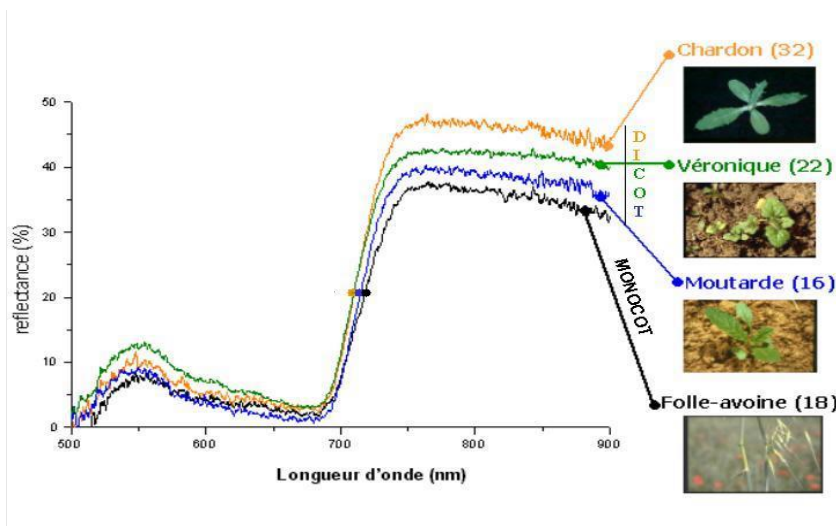


Figure 22 : Réflectance de 4 adventices : cirse des champs (*Cirsium arvense*), véronique de perse (*Veronica persica*), moutarde des champs (*Sinapsis arvensis*) et folle-avoine (*Avena fatua*), la seule monocotylédone ([AC12]).

Ces données spectrales associées à des informations spatiales (disposition des lignes de semis de la culture) ont ensuite été mobilisées afin de détecter et localiser des taches d'adventices à l'échelle d'une parcelle à partir d'images aériennes (Figure 23) de basse altitude (10 à 100 m) prise par une caméra embarquée dans un drone ([AC10], [ACL12] ; Vioix *et al.*, 2004).

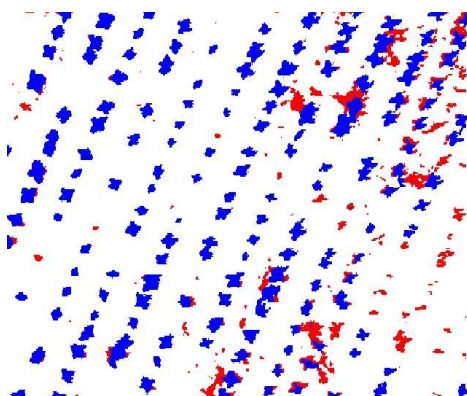


Figure 23 : Image résultante de la classification par la méthode de fusion de données spatiales et spectrales (en couleur rouge : les monocotylédones et en couleur bleue : les dicotylédones) ([ACL12]).

IV.5 - Utilisation des données acquises sur les adventices

L'acquisition de connaissance sur les adventices est une étape nécessaire qui permet d'aider à prendre des décisions quant à la gestion des adventices. L'accumulation des connaissances sur les adventices est

indispensable pour construire des outils permettant de suivre et de prédire leur développement.

Par exemple les valeurs de température et potentiel hydrique de base de germination pour chaque espèce peuvent être utilisées pour calculer leur temps hydrothermique qui, couplé aux informations sur la dormance de l'espèce, permet d'estimer les périodes potentielles de germination/levée de chaque espèce en fonction des conditions climatiques de l'année (Figure 24) ([ACL25]).

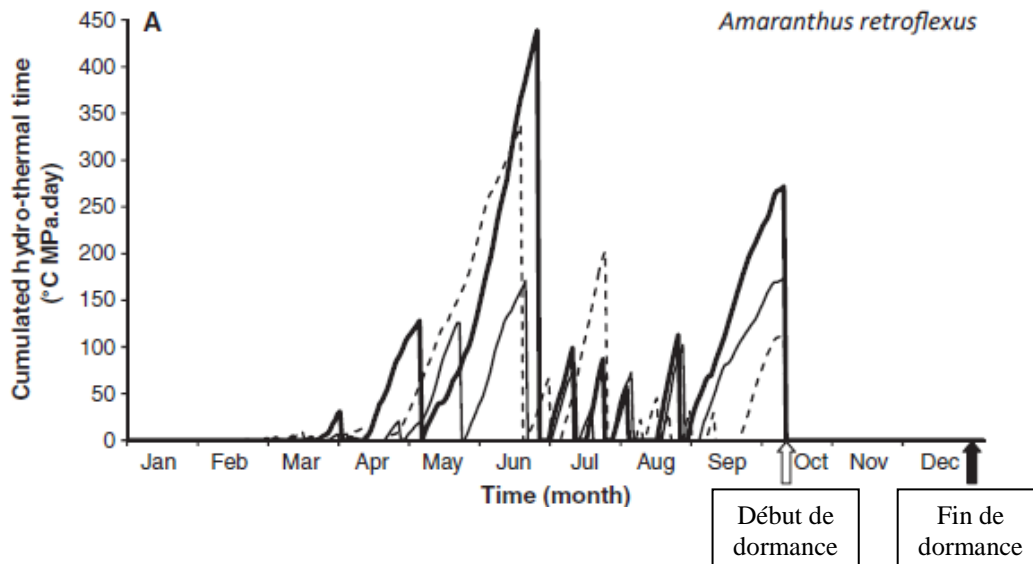


Figure 24 : Temps hydrothermique cumulé sur une année et calculé avec la température de germination de base et le potentiel hydrique de base de l'amarante réfléchie (*Amaranthus retroflexus*) ($T_b = 8,8^\circ\text{C}$ et $\Psi_b = -0,95\text{MPa}$) pour trois années climatiques (1998 ($T^\circ\text{C}$ moyenne de $11,2^\circ\text{C}$ et précipitation annuelle de 606 mm) (ligne continue)) ; 1999 ($11,4^\circ\text{C}$ et 846 mm (ligne pointillée)) ; 2003 ($12,9^\circ\text{C}$ et 517 mm (ligne continue en gras))). Les périodes potentielles de germination correspondent à toutes les périodes avec des valeurs positives de temps hydrothermiques ([ACL25]).

Parmi les espèces testées, les périodes potentielles de germination obtenues sont cohérentes avec celles déjà décrites dans la littérature confirmant que ces deux paramètres (température de base et potentiel hydrique de base) sont pertinents à utiliser dans le cadre de la prédiction de la germination (Grundy *et al.*, 2000 ; Colbach *et al.*, 2006) afin de prédire la ou les périodes potentielles (Bradford, 2002) et l'ampleur (Masin *et al.*, 2010) de la germination et de l'émergence pour des situations de terrain.

Les résultats obtenus sur la phase germination/levée des adventices mettent en évidence que le niveau espèce reste un niveau pertinent d'acquisitions de connaissances. Toutefois il est parfois nécessaire d'approfondir les connaissances au sein d'une espèce car la variabilité intraspécifique peut être importante due à des variables comme l'origine géographique de la population étudiée, les conditions environnementales dans lesquelles les semences ont été produites, ... Ce type d'information nécessite d'être pris en compte (Colbach *et al.*, 2006) afin de prédire de manière plus réaliste les périodes de germination/levée.

Les données ainsi acquises permettent également d'alimenter des modèles en particulier dans l'UMR Agroécologie, le modèle FlorSys (Figure 25) développé par plusieurs collègues. La mise en place d'expérimentation résulte régulièrement de discussion avec ces collègues afin de produire des données pour le modèle.

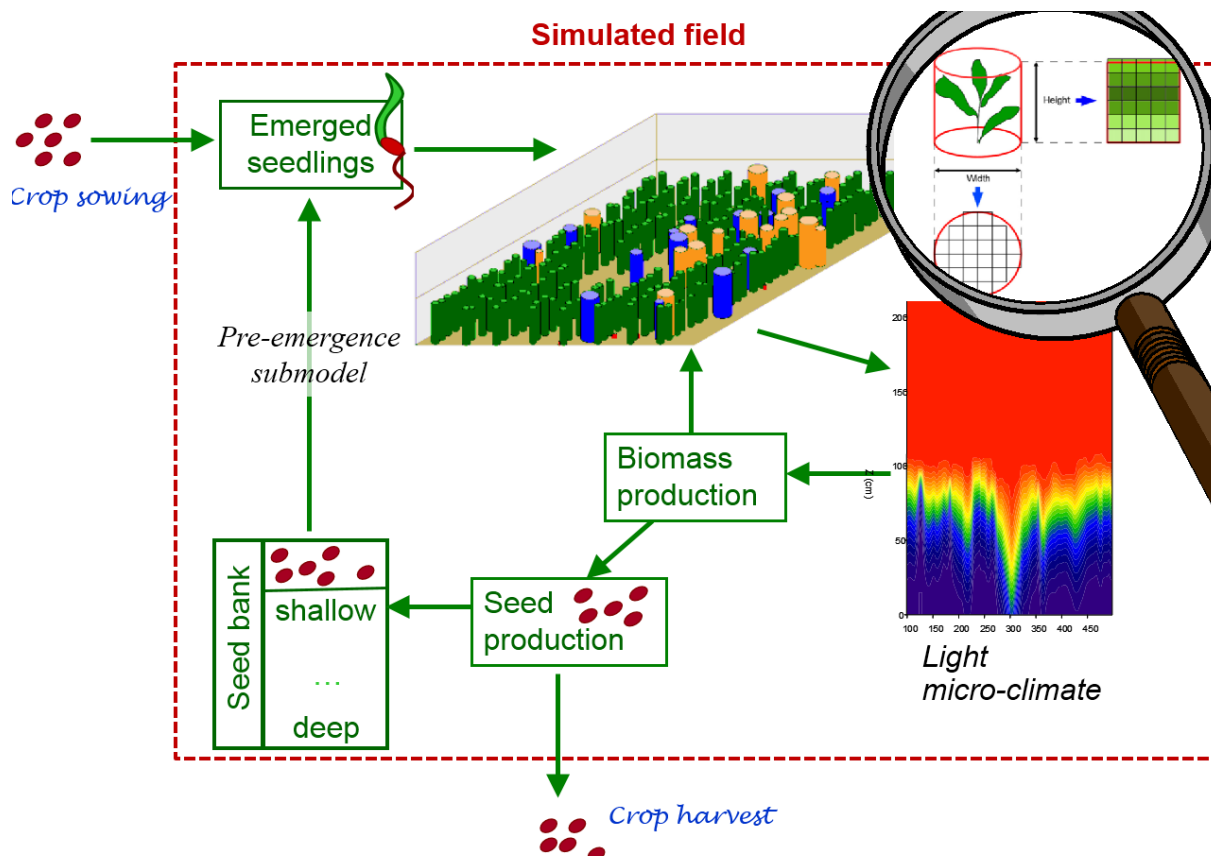


Figure 25 : Description simplifiée du modèle FlorSys (Colbach *et al.*, 2014). Chaque jour, des plantes adventices peuvent émerger de la banque de semences. Après le semis, les plantes cultivées émergent. Toutes les plantes émergées sont représentées sous la forme d'un cylindre à l'intérieur duquel leur surface foliaire est distribuée. Selon le rayonnement incident, le PAR_i est estimé dans chaque cylindre du couvert 3D et converti en biomasse, ce qui augmente la hauteur et le diamètre de chaque cylindre donc de chaque plante. A maturité de chaque plante, la biomasse végétale est convertie en production de semences. Les semences produites sont soit principalement exportées pendant la récolte (culture) soit ajoutées à la couche superficielle de la banque de semences du sol (adventices).

V. Evolution de la gestion des adventices

Les nouveaux enjeux de la production agricole amènent à repenser les systèmes de culture sur le principe de la protection intégrée (PI). Cette approche de gestion des bioagresseurs correspond à la mise en application de la protection intégrée des cultures (PIC) qui est définie comme un système qui fait appel à l'ensemble des leviers qui visent à empêcher l'établissement des bioagresseurs au sein d'une culture, à rendre la culture moins propice à leur développement et moins vulnérable aux dégâts qu'ils pourraient occasionner. La PIC intègre la combinaison de différentes techniques adaptées aux cultures qui perturbent directement ou indirectement le développement des bioagresseurs dans les champs cultivés. C'est bien la combinaison des leviers qui par effet complémentaire ou additif rend la stratégie pertinente (Lucas, 2007).

Pour le cas particulier des adventices, il s'agit de construire des **nouveaux systèmes de culture** basés sur des combinaisons de pratiques culturales réduisant l'usage des herbicides. La gestion des adventices peut se faire de façons directes et/ou indirectes. Les actions directes vont soit limiter leur cycle de développement (fauche, broyage ...), soit détruire la plante par un arrêt de leur croissance et développement (désherbage thermique, mécanique ...). Les actions indirectes visent à modifier leur environnement pour que ce dernier leur soit moins favorable (présence de couvert végétal, ...). En effet la solution exclusivement chimique de désherbage n'apparaît pas viable à long terme. On attend maintenant des systèmes agricoles qu'ils soient multi-performants, à la fois au moins autant productifs et plus respectueux de l'environnement, et qu'ils évitent l'apparition d'individus résistants aux herbicides. Cette évolution est également orientée par la **réglementation** ; en effet, le législateur a retiré l'autorisation à de plusieurs herbicides ou réduit leur usage.

Je me suis aussi impliqué dans des travaux dont l'objectif était de mieux percevoir le nouveau contexte réglementaire de la production, et de gérer des communautés adventices comprenant des individus résistants aux herbicides.

V.1 – Effet de l'évolution de la réglementation sur la disponibilité en herbicide

Dans le cadre des nouveaux enjeux de production, il est intéressant de connaître l'historique de la disponibilité des pesticides et en particulier des herbicides en France, et l'accès actuel à ces molécules. Si les herbicides constituent un des moteurs importants de l'évolution récente (environ 60 ans) des flores adventices ([AV05]), il existe aujourd'hui une certaine méconnaissance sur l'historique de leur utilisation dans les cultures et leur rôle dans l'évolution des communautés d'adventices ([AC19]). Depuis plus de 20 ans, de nombreux pays en Europe, dont la France, ont mis en place une politique afin de réduire l'utilisation des produits phytopharmaceutiques et donc vouloir aboutir à une utilisation plus durable (réduction de risques et d'impacts des pesticides). En conséquence, les législations européenne et française ont supprimé de nombreuses substances actives (Barzman et Dachbrodt-Saaydeh, 2011 ; [ACL23]).

Débuté par un simple travail d'étudiants à partir des informations contenues dans les index phytosanitaires édités par l'ACTA (Acta, 1961-2011) ([AC15]), ce travail a été poursuivi avec un collègue chercheur de l'Inra (B. Chauvel) et grâce à la compétence de deux chercheurs de l'unité, maintenant en retraite, dans le domaine des herbicides J. Gasquez et C. Gauvrit. De plus il a été possible d'accéder à des archives (ministère en charge de l'Agriculture) et donc de remonter à des données depuis 1944.

L'étude des documents récents et des archives a permis de montrer que l'utilisation à grande échelle des herbicides de synthèse a débuté en France juste après la seconde guerre mondiale ([AC16]). Au total, 228 substances actives ont été homologuées depuis 1944 (Figure 26) dont plus de la moitié d'entre elles a

été aujourd'hui retirée pour des raisons de sélectivité ou d'efficacité réduite et parce que des substances actives mieux adaptées et surtout moins nocives pour l'environnement et la santé ont été homologuées.

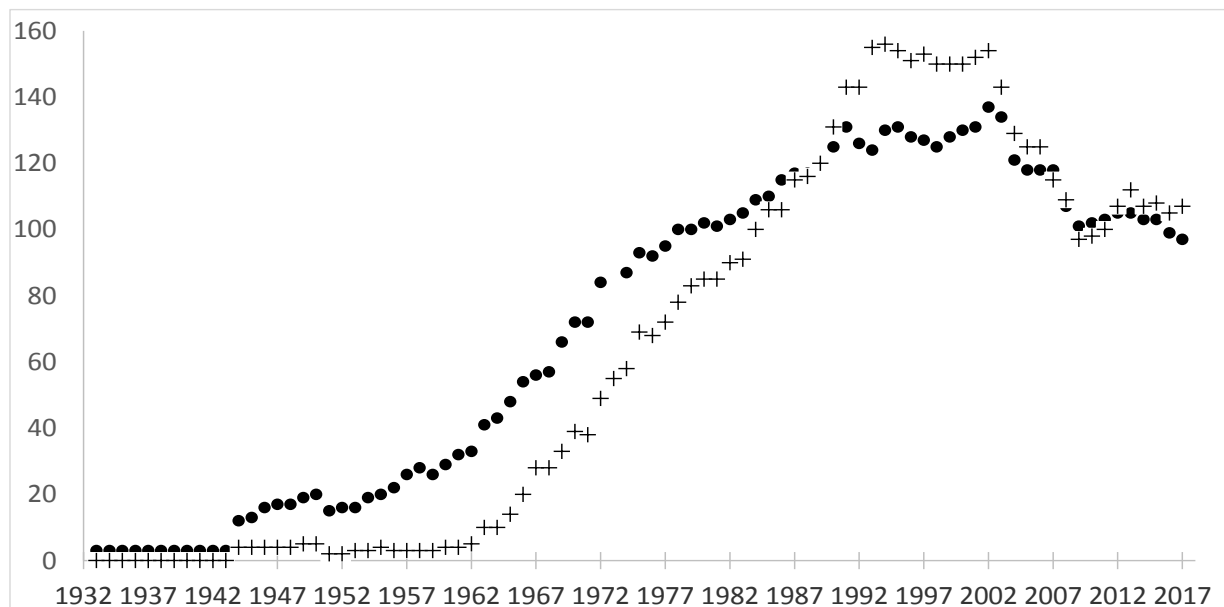


Figure 26 : évolution du nombre de substances actives et association de molécules herbicides de 1944 à 2017
 ● molécule seule ; + : association de deux ou plusieurs molécules.

Si de 1991 à 2004, plus de 130 substances actives étaient encore homologuées, leur nombre a diminué régulièrement depuis pour arriver à 97 en 2017. Par décennie, on peut observer jusque dans les années 2000 une augmentation du nombre de molécules, de familles et de types de mode d'action (Tableau 10).

Tableau 10 : Diversité des herbicides utilisés par tranche de dix années ([ACL23]).

| | 1940 | 1950 | 1960 | 1970 | 1980 | 1990 | 2000 | 2010 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Molécules seules | 3 | 20 | 29 | 72 | 102 | 125 | 131 | 103 |
| Association de molécules | 0 | 5 | 5 | 39 | 85 | 131 | 151 | 99 |
| Produits commerciaux | nc | 63 | 142 | 268 | 439 | 602* | 755* | 586* |
| Nombre de familles chimiques | 3 | 4 | 12 | 26 | 37 | 40 | 46 | 42 |
| Nombre moyen de molécules actives par famille | - | 3,5 | 2 | 2 | 2 | 4 | 3,5 | 3 |
| Nombre maximum de molécules active par famille | 3 | 17 | 9 | 26 | 35 | 37 | 26 | 31 |
| Nombre de modes d'action | 2 | 4 | 10 | 14 | 18 | 22 | 24 | 23 |
| Nombre moyen de molécules actives par groupes HRAC | - | 3,5 | 2,5 | 4 | 3 | 4 | 2,5 | 2 |
| Nombre maximum de molécules active par groupes HRAC | 3 | 12 | 6 | 14 | 18 | 19 | 17 | 23 |

*: le nombre exact de préparation commerciale à base de glyphosate n'est pas connue avec exactitude ce qui entraîne une certaine sous-estimation. ; nc non connues

Ce n'est qu'au cours des 15 dernières années qu'une diminution peut être observée. Cette réduction est, au-delà du durcissement de l'exigence réglementaire, à mettre en relation avec la chute du nombre de brevets déposés depuis plusieurs décennies ; de 2005 à 2009 compris, aucune nouvelle molécule n'a été homologuée en France (dernier mode d'action homologué en 1993). En France, plus d'une centaine de cultures (de la vigne aux prairies, des céréales aux cultures maraîchères et tropicales) sont conduites sur plus de 32 millions d'hectares, ce qui constitue, un élément d'explication du niveau élevé d'utilisation des produits commerciaux de type herbicide.

Cette base de données est complétée annuellement et pourrait inclure à l'avenir des nouvelles informations telles que les doses utilisées et des caractéristiques toxicologiques et écotoxicologiques. Un complément est en cours de réflexion sur la résistance aux herbicides et leurs risques d'apparition.

V.2 - Gestion intégrée d'adventices résistantes aux herbicides

Comme évoqué précédemment l'usage répété des herbicides depuis la seconde guerre mondiale est devenu un facteur important de l'évolution des espèces adventices avec le développement de phénomène résistance vis-à-vis de ces molécules. Ce phénomène conjugué à la baisse de disponibilité de molécules herbicides retirées dans le cadre de l'évolution de la réglementation oblige à revoir la conception des systèmes de culture afin de les rendre capables de gérer de façon durable les adventices. Il s'agit d'élaborer des itinéraires techniques basés sur des combinaisons de techniques culturales permettant la réduction de l'usage des herbicides. Les décisions stratégiques de mise en œuvre des nouvelles pratiques culturales peuvent se caractériser par des choix à long terme à l'échelle du système de culture, comme des évolutions des successions des cultures, du travail du sol, de la gestion des résidus de culture, ...

Dans le cas de la gestion de vulpin (*Alopecurus myosuroides*) résistant à des herbicides, le choix des combinaisons de pratiques culturales permettant de répondre au problème rencontré s'est appuyé sur des connaissances de la biologie de l'espèce acquises en partie dans la bibliographie (de Gournay, 1963 ; Moss, 1990). Une expérimentation a été mise en place pour tester des systèmes de culture capable de gérer des populations de *A. myosuroides*, résistantes à des herbicides inhibiteurs de l'ACCase (aryloxyphenoxypropionates dit "fops", en particulier le fenoxaprop-P-éthyl), présentes dans une parcelle d'un agriculteur. La parcelle était conduite depuis une décennie selon un système de culture privilégiant les successions de culture d'hiver, la simplification du travail du sol et l'emploi d'herbicides à pénétration foliaire avec le même mode d'action (herbicide de type "fops"). D'un point de vue agronomique, nous avons eu la possibilité de tester au champ un certain nombre d'hypothèses concernant, d'une part les interactions entre la biologie de cette adventice et les pratiques culturales et, d'autre part l'effet cumulatif des techniques utilisées. Il a fallu également tenir compte des conditions locales et des contraintes d'exploitation de l'agriculteur.

Le projet a nécessité la mise en place d'une expérimentation à long terme sur une parcelle mise à disposition par un agriculteur et réalisée *in situ* par l'agriculteur. La parcelle a été découpée en huit parcelles ; chaque parcelle correspondant à un système de culture différent. Deux types de successions culturales ont été mises en place : une rotation "classique" [RC] de cultures d'hiver de la région et une rotation dite "nouvelle" [NR] en introduisant une ou deux cultures de printemps (annexe 3). Trois stratégies de conduite de culture ont été retenues ; une conduite à fort niveau d'intrants [1] basée sur les pratiques agricoles courantes de la région, une conduite du blé visant à minimiser l'infestation de vulpin [2] (décalage de date de semis, labour, désherbage en fonction de la présence du vulpin), et une conduite à faible niveau d'intrants [3] (décalage de date de semis tardif, travail du sol simplifié, un seul herbicide). Un système [4] basé sur la logique du

système [3] a été testé au cours de la deuxième succession avec la ré-application d'herbicides de type "fops". Cette étude a été réalisée avec un collègue de l'Inra (B. Chauvel) suite à la demande d'une coopérative agricole locale (Dijon Céréales). L'étude a été financée durant trois années (1997 à 1999) par le Conseil Régional de Bourgogne, et a duré au total huit ans c'est à dire plus de deux successions culturales.

Ainsi cette parcelle est utilisée pour expérimenter des combinaisons de techniques culturales se substituant à la seule application d'herbicide comme moyen de gestion du vulpin. De plus les herbicides utilisés par l'agriculteur à l'origine de la résistance des vulpins ont été remplacés par des herbicides à mode d'action différent. Plus de 300 plantes m⁻² étaient observées au départ de l'expérimentation. Le choix des stratégies chimiques a été réalisé en fonction des connaissances acquises sur la biologie de la plante et sur l'efficacité théorique (expertise scientifique sur les résistances croisées) et locale des produits (expertise du technicien conseil).

- *En succession de cultures d'hiver :*

L'association de pratiques culturales, telles que le labour et/ou le décalage de la date de semis, au désherbage chimique a permis de réduire très rapidement la densité de vulpin (moins de 1 plante m²) (Tableau 11). Par contre, l'ajustement simple du programme de désherbage n'a permis d'atteindre un niveau de faible densité de vulpin qu'après trois années.

- *En succession de cultures de printemps et d'hiver :*

La mise en place de culture de printemps a immédiatement et considérablement réduit la densité de vulpins dans les parcelles. Dès la deuxième année, toutes les parcelles ont une densité de vulpins inférieure à 2 plantes m⁻² (Tableau 11).

Tableau 11 : Effet des systèmes de culture sur la densité (plantes m⁻²) de vulpin sur la période 1996-2002

| | 96-97 | | | 97-98 | | | 98-99 | | | 99-00 | | | 00-01 | | | 01-02 | | |
|------------|-------|-----|-----|-------|-----|------|-------|-----|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| | Pic | C1 | C2 | Pic | C1 | C2 | Pic | C1 | C2 | Pic | C1 | C2 | Pic | C1 | C2 | Pic | C1 | C2 |
| RC1 | Ne | 391 | 113 | 73 | 97 | 17 | 132 | 9,3 | 0,8 | 0 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 2,2 | 1,5 | 48 | 33 | 7,1 |
| RC2 | Ne | 58 | 25 | 18 | 8,5 | 0,01 | 4,8 | 0,8 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0,3 | 0 | 0,3 | 0,03 | 3,2 | 0,3 | 0,02 |
| RC3 | Ne | 239 | 32 | 19 | 46 | 12 | 151 | 29 | 1,8 | 0 | 2,5 | 2,8 | 7,5 | 4,7 | 3 | 198 | 73 | 5,4 |
| RC4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0 | 0,6 | 1 | 1 | 1,9 | 1,8 | 39 | 51 | 13,7 |
| NR1 | 2354 | 13 | 5,4 | 92 | 30 | 0,1 | 18 | 1,9 | 0,01 | 6 | 0,00 | 0,00 | 0 | 0,02 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0,02 |
| NR2 | 2752 | 40 | 14 | 67 | 19 | 0,1 | 8,5 | 1,4 | 0,00 | 6 | 0,00 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| NR3 | 1369 | 17 | 19 | 89 | 15 | 1,7 | 63 | 10 | 2,4 | 25 | 3 | 0,04 | 0 | 2,2 | 1,3 | 21 | 16 | 5,5 |
| NR4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 6 | 0,00 | 0,01 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0 | 1,7 | 1,8 |

Ne : non estimé ; Pic : période d'inter-culture, C1 : premier comptage avant premier passage d'herbicide, C2 : deuxième comptage juste avant récolte. Dans les cas de très faible densité, le dénombrement des plantes a été réalisé par un comptage de toutes les plantes présentes sur la parcelle ([ACL18]).

Les six années d'expérimentation ont permis de démontrer qu'il est possible de mettre en place des itinéraires techniques permettant une très forte réduction de la population de vulpins résistants ([ACL10], [ACL18]) ; des densités allant de 0 à 14 plantes m⁻² étaient observés dans les différents systèmes après six années d'essai (Tableau 11). Toutefois, l'utilisation intégrée et combinée des pratiques non chimiques (labour (RC1), faux semis (RC3), diversification de la succession (NR2 et NR3)) a permis un contrôle plus

rapide de la population de vulpins à la récolte (Tableau 11). L'insertion de cultures de printemps (NRx) peut même empêcher la présence de l'espèce une année donnée.

Cette plateforme a également permis de tester l'hypothèse comme la "ré-augmentation" de la densité de plantes résistantes par des pratiques favorisantes (RC4 ; NR4, ici l'usage d'herbicides de type "fops"). Si l'hypothèse d'une très faible différence de fitness entre individus résistants et sensibles laissait penser que les gènes de résistance étaient toujours bien présents, il était intéressant de montrer sur l'essai l'impossibilité de réutiliser avec efficacité la famille d'herbicides concernés par la résistance.

Au terme de l'expérimentation, les pratiques culturales mises en place pour maîtriser les vulpins ont porté leur fruit ([AV01], [AC03], [AV02], [ACL10], [AC11], [ACL18]). L'intérêt d'une telle démarche n'est pas de proposer des systèmes de culture figés pour lutter contre une espèce adventice mais de proposer un éventail de solutions techniques parmi lesquels les agriculteurs pourront choisir le plus approprié à leur système de production. De plus l'essai réalisé à Lux a servi à valider trois articles portant sur des travaux de modélisation par le jeu de données apporté. Cette plateforme a servi de vitrine au niveau régional visitée par plusieurs groupes d'agriculteurs. L'intérêt du dispositif a été de confronter une démarche scientifique à la réalité de terrain, en recueillant les ressentis des agriculteurs.

Pour conclure sur cette partie, les systèmes de culture conçus dans le cadre de la protection intégrée nécessitent évidemment d'être évalués. Les exigences croissantes de durabilité amènent à évaluer les systèmes de culture sur d'autres critères que leurs performances agronomiques. Il existe maintenant une gamme d'indicateurs et d'outils d'évaluation permettant d'appréhender la diversité des critères de la durabilité ([AC14]). Au sein de l'UMR Agroécologie, ce type d'évaluation multicritère a été entrepris sur un dispositif expérimental de longue durée (dispositif PIC du domaine expérimental de l'Inra de Dijon, site de Bretenière) visant à tester différents systèmes de culture conçus sur le principe de la protection intégrée (Chikowo *et al.*, 2009). L'utilisation de tels outils permet d'envisager des analyses « multi-sites » de systèmes agricoles présentant des caractéristiques contrastées ; il est envisagé une évaluation sur un dispositif composé de parcelles conduites par des agriculteurs (site d'étude de Fenay). Les évaluations devront permettre d'identifier les intérêts et limites de différents systèmes de culture étudiés.

En perspective du projet de recherche

Le secteur agricole interroge la recherche sur des solutions alternatives aux pesticides de synthèse pour contrôler les bio-agresseurs (agent pathogène, ravageur, adventice) et ainsi éviter les impacts de l'usage des pesticides. Dans ce contexte, des solutions alternatives qui permettent à la fois de maintenir les rendements et de contrôler la flore adventice pour une agriculture respectueuse de l'environnement sont nécessaires pour maintenir la production végétale et espérer une réduction de 50% de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques de synthétiques (objectif du Plan Ecophyto). Petit *et al.* (2015b) ont montré en analysant 55 situations (parcelles expérimentales et d'agriculteurs avec des systèmes de culture conventionnels, intégrés et biologiques) que la réduction de l'application d'herbicides de synthèse n'est pas antagoniste avec la production agricole à condition que des solutions alternatives soient mises en place et combinées entre elles. En effet l'utilisation d'une combinaison de leviers agronomiques est un élément clé

de la prévention et de la maîtrise des adventices (Barzman *et al.*, 2015). De plus, cette évolution des pratiques culturales devrait permettre des gains de biodiversité, en particulier de la diversité des adventices (Petit *et al.*, 2015b).

Comme évoqué précédemment, la protection intégrée des cultures (PIC) est une approche qui fait appel à la création de combinaisons de leviers. Cette approche repose également sur un autre principe ; les décisions doivent être fondées sur la surveillance des parcelles et du territoire, et sur la détermination de seuils d'intervention obtenus grâce à des **outils d'aide à la décision** conçus à partir d'observations, d'analyses de risque, de simulations produites par des modèles, etc.

Compte tenu de l'efficacité des herbicides, les leviers agronomiques de désherbage ont été jusqu'à présent peu utilisés dans les systèmes de culture. Actuellement, ces pratiques de désherbage reviennent sur le devant de la scène en mettant l'accent sur le biocontrôle. Les nouvelles réglementations et les réserves sur les produits phytopharmaceutiques devraient permettre le développement du marché du **biocontrôle**. Le marché français est estimé à 100 millions d'euros, ce qui représente 5% du marché des produits phytopharmaceutiques. Ce marché représente 550 millions d'euros en Europe et 1,6 milliards d'euros dans le monde avec une croissance positive d'environ 15% par an (Quinlan et Lisanky, 2013).

VI. Projet de recherche

L'utilisation de produits phytopharmaceutiques (ou pesticides) en agriculture remonte à l'antiquité (usage de soufre, d'arsenic, etc). Les progrès de la chimie (minérale et organique) et l'évolution de l'agriculture ont favorisé leur utilisation. Ces dernières décennies ont été le témoin de l'essor de ces produits, rendant leur application très largement répandue dans la plupart des systèmes agricoles et des pratiques amateurs (jardins, entretien des espaces, etc...) en particulier pour contrôler les adventices. En effet la lutte contre les adventices est toujours une préoccupation majeure, souvent laborieuse et coûteuse, quel que soit le type d'environnement. En 2016, le marché en France et en Europe des herbicides est équivalent à celui des fongicides et insecticides réunis (UIPP, 2018). L'apport de ces produits dans la maîtrise des ressources alimentaires et l'amélioration de la sécurité sanitaire est aujourd'hui indéniable. Cependant les pesticides sont parallèlement pointés du doigt pour leurs impacts potentiels sur l'environnement et les écosystèmes (IFEN, 2010), et les risques qu'ils sont susceptibles d'engendrer pour les santés animales et humaines (Inserm, 2013).

L'objectif est de mieux utiliser, de réduire voire ne plus appliquer de produits phytopharmaceutiques. Dans ce cadre, il est indispensable que les agriculteurs disposent d'outils adaptés et performants (**outils d'aide à la décision**) leur permettant de les aider au moment de prendre des décisions, et de techniques alternatives à la lutte chimique. Parmi l'ensemble des solutions alternatives, le **biocontrôle** est l'une d'entre elle.

La recherche de produits de biocontrôle pour la protection des végétaux est devenue actuellement une thématique importante de recherche pour le développement de systèmes alternatifs. L'un des premiers cas documentés d'utilisation des biopesticides date de 1835 ; Agostino Bassi a montré que des spores du champignon *Beauveria bassiana* sont capables de provoquer la mort d'insectes (symptôme de muscardine) (Olson, 2015). Le principal biopesticide commercialisé actuellement est conçu à base de *Bacillus thuringiensis* (Bt), une espèce bactérienne qui produit une toxine (appelée toxine Bt) qui perturbe le fonctionnement intestinal de l'insecte lorsqu'il l'ingère. À l'heure actuelle, plus de 75 % de l'application des biopesticides concerne des produits à base de toxine Bt. Le biocontrôle des adventices est beaucoup moins développé que celui des ravageurs et agents phytopathogènes.

Si les microorganismes représentent un potentiel intéressant pour le biocontrôle, il pourrait être intéressant de rechercher de nouvelles molécules d'origine naturelle pour réduire l'application d'herbicides. Les bioherbicides sont des produits d'origine naturelle pour le contrôle des adventices (Bailey, 2014). Ces nouveaux produits devraient être plus respectueux de l'environnement car ils sont produits à partir de candidats présents dans l'environnement (Rizvi *et al.*, 2012) ; la demi-vie des produits d'origine naturelle est habituellement plus courte que celle des produits chimiques (Duke *et al.*, 2000). Cependant, les produits d'origine naturelle ne signifient pas qu'ils sont réellement inoffensifs. En effet, certaines toxines naturelles produites par les plantes ou les micro-organismes sont présentes dans l'environnement et peuvent être dangereuses pour d'autres organismes, y compris les mammifères.

Les produits bioherbicides peuvent être soit des organismes vivants, soit des métabolites naturels produits par ces organismes au cours de leur croissance et de leur développement. Le spectre d'activité du bioherbicide doit être soigneusement évalué (Duke *et al.*, 2000). Les bioherbicides sont très attendus dans l'agriculture, en particulier pour faire face au retrait des substances actives synthétiques et / ou des spécialités commerciales, et pour gérer l'augmentation du nombre de populations d'adventices résistantes aux herbicides de synthèse ([AC26], [ACL35]).

VI.1 - Recherche de candidats à activité herbicide dans le cadre du biocontrôle

Les alternatives à l'application de pesticides se développent, dont l'utilisation de solutions de **biocontrôle**. Le biocontrôle est un levier qui peut être associé à d'autres pratiques culturales dans le cadre de la mise en place de la protection intégrée des adventices pour la conception de nouveaux systèmes de culture. Le biocontrôle repose sur l'utilisation des interactions entre organismes ou sur l'application de substances naturelles permettant de maintenir la population du bioagresseur en-deça d'un seuil acceptable plutôt que de l'éradiquer (Herth, 2011).

Les agents de biocontrôle sont classés en quatre catégories (Herth, 2011) :

- les macroorganismes (par ex. insectes prédateurs, insectes parasitoïdes, nématodes, ...),
- les microorganismes (champignons, bactéries, virus),
- les médiateurs chimiques (par ex. phéromones) et,
- les substances naturelles (d'origine végétale, fongique, bactériologique, animale, ...).

Macroorganismes, microorganismes et substances naturelles sont considérés comme des candidats prometteurs pour le contrôle biologique des adventices (Zimdahl, 2013 ; Hinz *et al.*, 2014) en agriculture conventionnelle dans le cadre de la protection intégrée et en agriculture biologique (Deravel *et al.*, 2014). Une recherche bibliographique a été entreprise centrée sur les microorganismes et substances naturelles (par ex. des acides aminés (Sands *et al.*, 2003)).

L'objectif du projet est de repérer, d'identifier et caractériser des candidats d'origine naturelle ayant des activités "herbicide", étapes initiales au développement de produits de biocontrôle vis-à-vis des adventices. Ces produits d'origine naturelle peuvent être des microorganismes en tant qu'agent de lutte biologique ou des substances naturelles produites par des plantes et des microorganismes. Les travaux menés au sein de l'UMR Agroécologie concernent l'étape de recherche de **candidats de type microorganisme** à action herbicides et celle de l'étude des mécanismes d'action des candidats potentiels.

Les personnels de l'UMR Agroécologie impliqués dans le projet développent des compétences en malherbologie, microbiologie et en écologie microbienne. Ainsi trois pôles de l'UMR contribuent au développement de ce projet (pôles GestAd, IPM (Mécanismes et gestions des Interactions Plantes Microorganismes) et BIOMÉ (Biologie et fonctions écosystémiques des sols)). Ces travaux sont en partie réalisés en collaboration avec le secteur privé, qui se chargera de finaliser le développement des produits de biocontrôle. Ainsi une partie de ces travaux donne lieu à la mise en place d'une bourse CIFRE prise en charge par la société De Sangosse et l'ANRT (Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie).

VI.1.1 - Etat des lieux des candidats au biocontrôle pour la gestion des adventices

Le choix a été fait de rechercher que des candidats de type microorganismes et molécules naturelles correspondant aux compétences des différents personnes impliquées dans le projet. L'analyse de la bibliographie a permis de faire le point sur l'état des connaissances au niveau international puis de souligner les lacunes dans ce domaine. Parmi les microorganismes, différents types d'organismes ont été identifiés : champignons, oomycètes, bactéries, rhizobactéries, virus. La littérature révèle peu de molécules d'origine naturelle à effet herbicide identifiées jusqu'à présent, et la rareté des études décrivant les mécanismes impliqués dans leur activité herbicide (Bailey, 2014 ; Harding et Raizada, 2015 ; Trognitz *et al.*, 2016). Toutefois la bibliographie a mis en évidence les potentialités de ces deux groupes de candidats comme bioherbicide, les microorganismes en tant qu'agents biologiques de biocontrôle, et les substances

naturelles en tant que molécules naturelles phytotoxiques qui peuvent provenir de microorganismes phytopathogènes ou de plantes aux propriétés allélopathiques.

L'analyse globale des articles au cours des cinquante dernières années (environ 300 articles) montre que le niveau de publications sur ce sujet est très variable. Les premiers articles ont été publiés au milieu des années 1970. Trois périodes ont été identifiées au cours de ces cinquante années; ces périodes tiennent compte du nombre d'articles publiés. Ainsi, entre 1973 et 1991, la publication a été très sporadique, avec moins d'un article publié par an (soit quinze articles) (Figure 27). En presque vingt ans, entre 1992 et 2009, le nombre moyen d'articles de candidats naturels à activité herbicide a été multiplié par sept (Figure 27). Enfin c'est entre 2010 et 2017 que le nombre de publications est le plus important. Au cours de ces sept années, la moyenne de publication est passée à une douzaine d'articles par an (Figure 27). Sur l'ensemble de la période analysée, la majorité des articles concerne les champignons. Cependant, sur la période 2010 à 2017, la part des articles consacrée à la recherche de molécules naturelles augmente fortement et devient majoritaire par rapport à celle dédiée aux microorganismes.

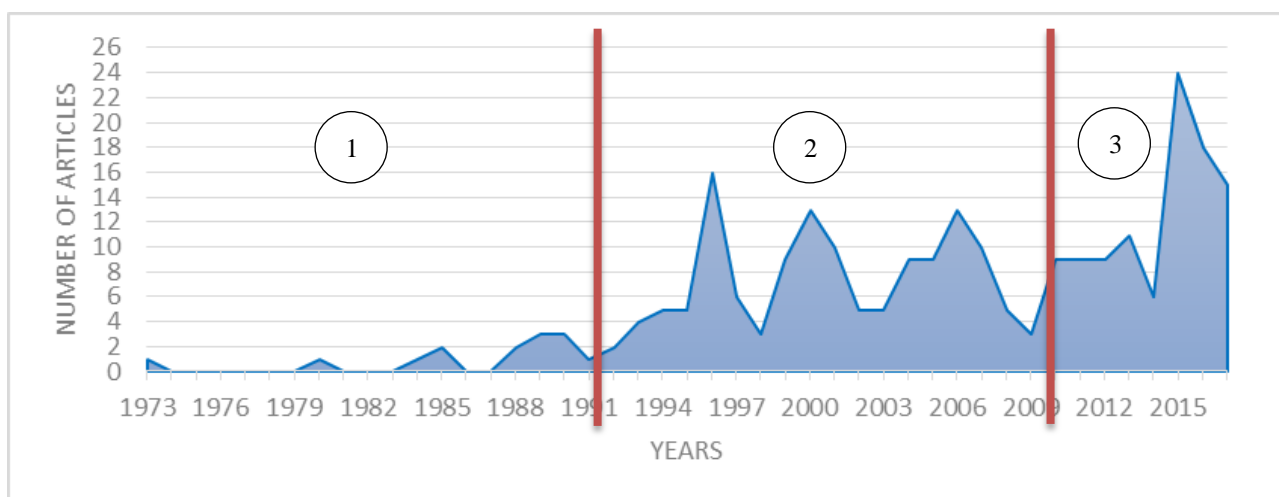


Figure 27 : Nombre d'articles publiés entre 1973 et 2017 sur les microorganismes et les substances naturelles à action herbicide.

Le choix a été fait de travailler sur la recherche de microorganismes à activité herbicide. Ce choix est lié aux compétences impliquées de l'UMR Agroécologie avec un développement plus important sur les champignons et les oomycètes que sur les bactéries.

Agents de lutte biologique d'origine fongique à action herbicide

A partir des articles collectés sur la période de 1973 à 2017, 45 genres de champignons et oomycètes ont été identifiés (Figure 28) ; ceci représente une centaine d'espèce fongique. Les genres de champignon *Alternaria*, *Colletotrichum*, *Puccinia*, *Phoma* et *Fusarium* représentent plus de 50% des publications. Ce sont des genres bien connus comme pathogènes des espèces végétales.

Parmi les cinq genres les plus étudiés, quatre sont à l'origine de développement de bioherbicide. Un bioherbicide issu de *Alternaria destruens* L. Simmons souche 059 est commercialisé sous le nom de Smoulder® ; ce champignon est pathogène de la cuscute, une plante parasite. BioMal® et LockDown® sont des bioherbicides dérivés de *Colletotrichum gloeosporioides* f. sp. *malvoisae* ATCC (American Type Culture Collection) 20767 et *Colletotrichum gloeosporioides* f. sp. *aeschynomene* ATCC 20358, respectivement. Ces bioherbicides gèrent respectivement les adventices de la famille des Malvaceae et *Aeschynomene virginica*. Enfin, le bioherbicide issu de *Phoma macrostoma* souche 94-44B a été développé pour lutter contre des

mauvaises herbes de type eudicotylédone dans le gazon (Bailey, 2014). Le genre *Puccinia*, responsable des rouilles, est un agent phytopathogène déjà utilisé contre les adventices. La première utilisation des rouilles pour lutter contre les adventices a été réalisée en Australie (Hasan, 1972). Les rouilles semblent être efficaces dans la gestion de certaines espèces d'adventices (par exemple *Senecio vulgaris*, *Cirsium arvense*, *Isatis tinctoria*) (Müller-Schärer et Frantzen, 1996 ; Bailey, 2014). Cependant *Puccinia* est un champignon pathogène obligatoire donc son utilisation à grande échelle risque d'être limitée. Toutefois un bioherbicide dérivé de *Puccinia thlaspeos* C. Shub. «Woad strain» est disponible aux Etats-Unis sur demande pour lutter contre une espèce adventice *Isatis tinctoria* (Bailey, 2014).

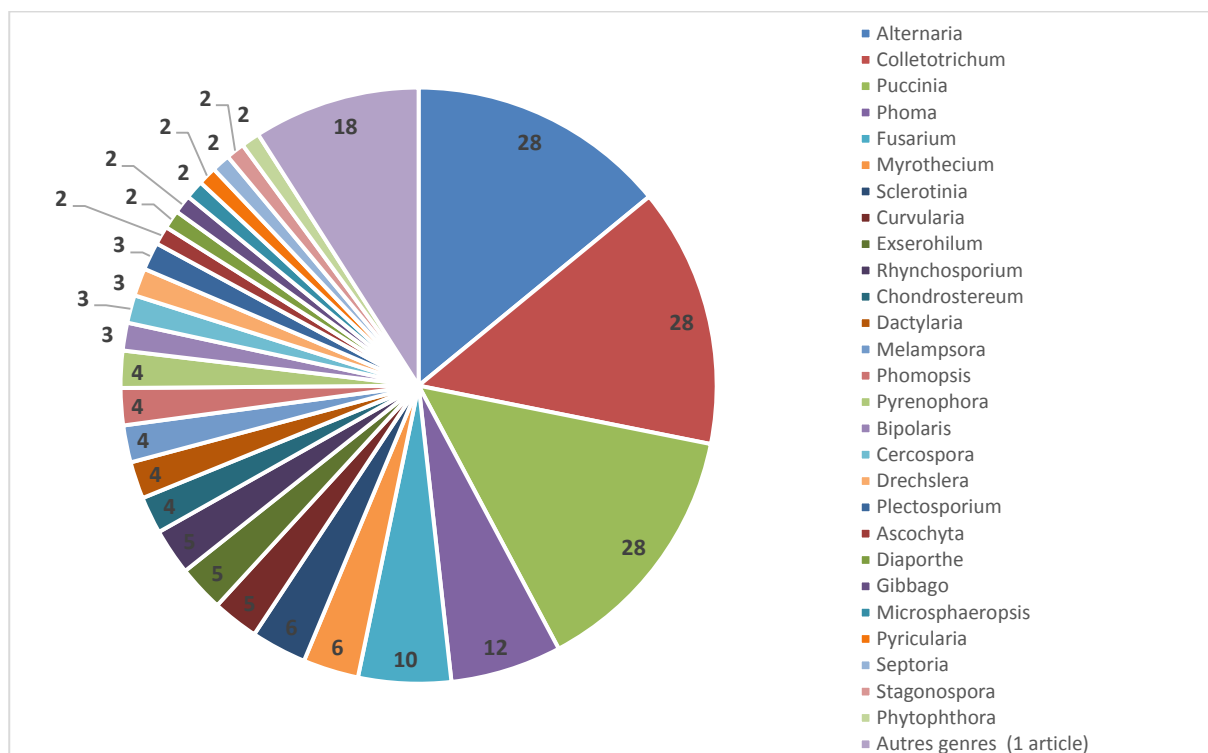


Figure 28 : Liste et effectif des genres de champignons et d'oomycètes identifiés avec une activité herbicide issus de la littérature.

Agents de lutte biologique d'origine bactérienne à action herbicide

Sur la période étudiée, cinq genres ont été recensés. Un genre se démarque des autres, avec près de 40 % des études ; il s'agit du genre *Streptomyces*. Il est suivi des genres *Xanthomonas* (18 %), *Pseudomonas* (18 %) et *Agrobacterium* (17 %) et *Lactobacillus* (9 %). Ceci représente une dizaine d'espèces de bactérie. 24% des études ont été effectuées sur *Streptomyces hygroscopicus* et la seconde espèce la plus étudiée est *Pseudomonas syringae* (12 %).

Entre 1980 et 2001, huit bioherbicides ont été recensés dans le commerce (Charudattan, 2001). En 20 ans le nombre de biopesticides a augmenté dans le monde, cependant la part des bioherbicides représente moins de 10% de tous les biopesticides (biofongicides, biobactéricides, bioinsecticides et bionématicides) (Bailey, 2014). A ce jour, 14 solutions bioherbicides commerciales ont été repérées dans la littérature scientifique. Au total, 14 solutions bioherbicides commerciales ont été repérées dans la littérature dont seulement quatre en Europe et une en France ([AC26]). Seuls quelques pays commercialisent des bioherbicides parmi lesquels le Canada (trois), les Etats-Unis (quatre), l'Ukraine (un) (Bailey, 2014). Depuis 2015, la France fait partie des pays qui commercialisent au moins un bioherbicide (Beloukha®, mélange

d'acides nonanoïque ou pélargonique). Parmi les candidats testés, seuls quelques uns ont atteint le marché commercial (Ghorbani *et al.*, 2005). Le faible développement des biopesticides, et en particulier des bioherbicides, peut également être attribué à des difficultés de formuler ces produits (Ash, 2010).

L'analyse du contexte met bien en évidence que peu de solutions de biocontrôle sont disponibles pour la lutte contre les adventices. En 2014, Bailey définit les bioherbicides comme des produits de contrôle ayant un pouvoir désherbant, dérivés d'organismes vivants y compris des molécules qu'ils produisent au cours de leur croissance.

L'analyse de la littérature scientifique révèle aussi que les travaux sur les bioherbicides ont été principalement réalisés par des laboratoires de recherche spécialistes en phytopathologie et mycologie, et très peu par des laboratoires de malherbologie. En effet, l'unicité d'hôte très souvent rencontrée dans les études scientifiques n'a jamais poussé les malherbologues à étudier le potentiel herbicide des agents pathogènes des adventices. Les cas d'études identifiées dans la littérature montrent peu d'études sur des larges gammes d'adventices.

Malgré cela, au regard de l'importance du marché des herbicides, des attentes en matière de produits de biocontrôle et du faible développement des bioherbicides, il existe un intérêt majeur à conduire un projet de recherche pour identifier des candidats à action herbicide et développer des bioherbicides à intégrer dans les nouvelles offres alternatives de gestion des adventices.

VI.1.2 - Recherche de candidats de type microorganisme à action herbicide

L'environnement des espèces végétales ainsi que les plantes comportent des microorganismes. Différentes interactions sont mises en place entre les plantes et les microorganismes. Les deux principales sont les interactions parasitaires, avec les microorganismes qui exercent une activité de type pathogène sur les plantes, et les interactions symbiotiques à effet positif pour les deux partenaires de l'interaction. Dans le cadre de notre projet, ce sont les microorganismes parasitaires des espèces adventices qui nous intéressent. Deux approches d'investigation sont envisagées ; la recherche de candidats de type parasite actif vis-à-vis d'adventices à l'échelle de la **plante** et à l'échelle de la **communauté** (Figure 29).

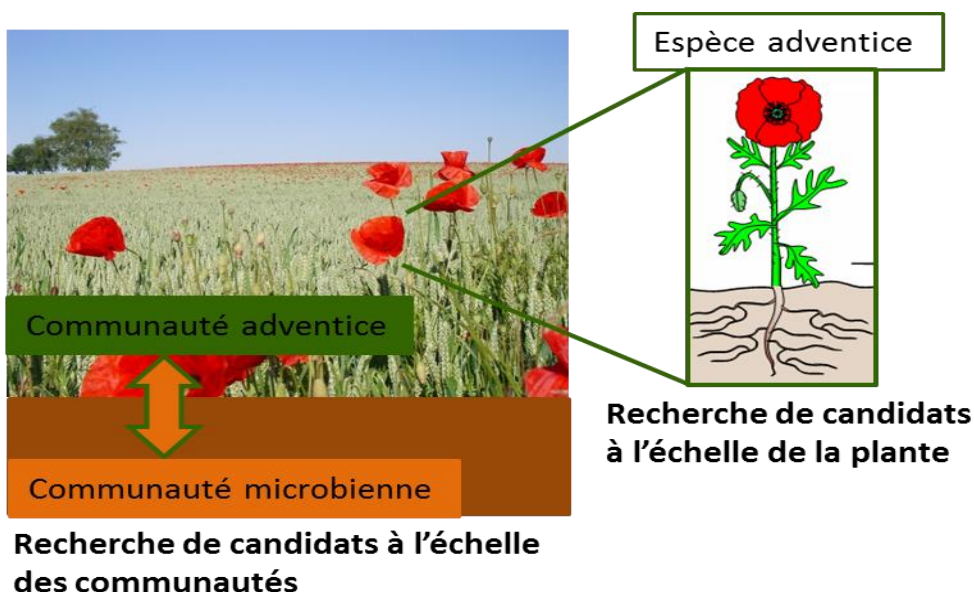


Figure 29 : Présentation des deux échelles de recherche des candidats à action herbicide : échelle de la plante-adventice et échelle des communautés adventices et microbiennes des sols.

VI.1.2.1 – Recherche de candidats à l'échelle de la plante

Des microorganismes sont présents sur les parties aériennes des plantes (la **microflore épiphyte**) et dans l'environnement des racines des plantes (microflore rhizosphérique) (Figure 30). Des microorganismes sont possiblement présents à l'intérieur des plantes (**microflore endophyte**). Pour les espèces annuelles, la majorité des espèces adventices, un dernier compartiment est intéressant à explorer la **spermosphère**, zone de sol qui entoure les semences des plantes.

Les recherches se concentreront sur les microorganismes présents au niveau des parties aériennes des plantes (microflore épiphyte et endophyte) et sur les microorganismes de la spermosphère des semences d'adventices (Figure 30). L'essentiel des recherches sera réalisé sur **les champignons** et **les oomycètes**.

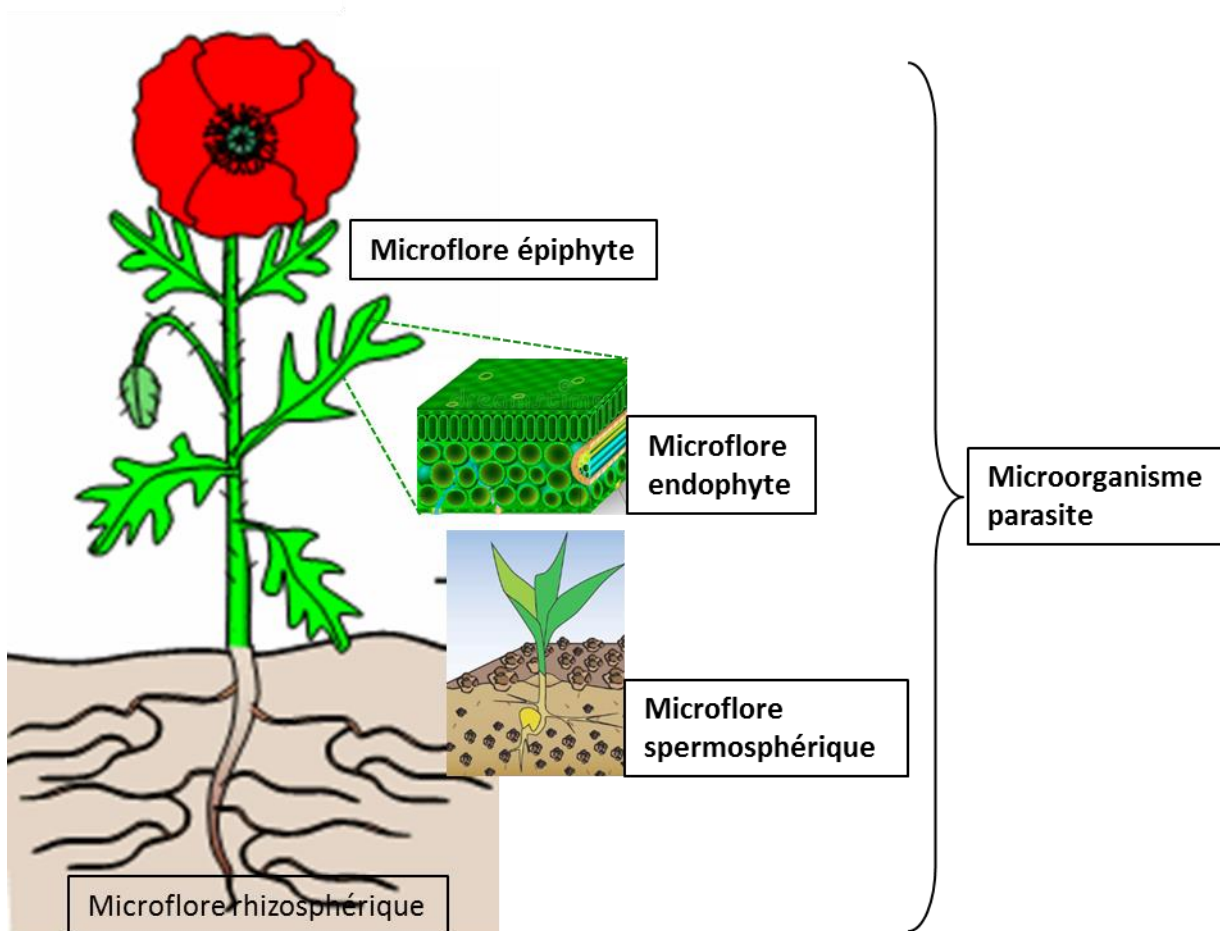


Figure 30 : Description des différentes microflores associées à un végétal ainsi que leur répartition sur et dans le végétal. Les textes en gras correspondent aux communautés qui seront étudiées dans le cadre du projet.

La phytopathologie s'est très peu intéressée à la malherbologie et donc peu d'informations sont disponibles concernant d'une part les agents phytopathogènes responsables de maladies chez les adventices et d'autre part les mécanismes associés de la pathogénicité chez ces espèces. Ainsi des adventices symptomatiques hébergent des microorganismes responsables des symptômes observés mais ils ne sont pas isolés et identifiés par manque d'intérêt. Quelques champignons et oomycètes phytopathogènes et présentant un spectre d'hôtes très large incluant des plantes d'intérêt agronomique et des adventices ont certes déjà été identifiés (Charudattan, 2001 ; Ghorbani *et al.*, 2005 ; Bailey, 2014) mais aucune estimation de la diversité des agents pathogènes des adventices les plus courants n'a été réalisée.

VI.1.2.1.1 - Recherche de candidats sur les parties aériennes des végétaux

La recherche de candidats consiste dans un premier temps à prospecter et collecter des parties aériennes d'adventices symptomatiques et non symptomatiques présentes dans et en bordure de parcelles agricoles. Sont considérées *a priori* comme individus symptomatiques les plantes attaquées par un ou des agents pathogènes. Les individus collectés sont ensuite rapportés au laboratoire afin de rechercher les candidats à action herbicide.

Espèces végétales collectées

Les collectes se concentreront sur les espèces d'adventices les plus représentées dans les champs cultivés en France et considérées comme les plus dommageables et concurrentielles vis-à-vis des plantes cultivées. En tenant compte des critères préalablement cités et en retenant des monocotylédones et des dicotylédones, une liste d'environ 20 espèces adventices est proposée (*Alopecurus myosuroides*, *Amaranthus retroflexus*, *Ambrosia artemisiifolia*, *Avena fatua*, *Anisantha sterilis*, *Cirsium arvense*, *Chenopodium album*, *Convolvulus arvensis*, *Digitaria sanguinalis*, *Echinochloa crus-galli*, *Elytrigia repens*, *Fallopia convolvulus*, *Galium aparine*, *Geranium dissectum*, *Lolium spp.*, *Papaver rhoeas*, *Polygonum aviculare*, *Rumex obtusifolius*, *Senecio vulgaris*, *Setaria viridis*, *Sinapis arvensis*, *Solanum nigrum*, *Veronica persica* et *Vulpia myuros*, les monocotylédones sont soulignées).

En parallèle, des parties aériennes des espèces cultivées présentes dans les parcelles collectées sont également à prélever.

Les populations d'adventices sur lesquelles les tests de pathogénicité et de sélectivité seront réalisés seront issues de la carpothèque-séminothèque de l'UMR Agroécologie.

Zones de prospection

Ce travail consiste à prospecter sur le terrain (essentiellement en parcelle agricole) afin de collecter des adventices symptomatiques et non symptomatiques (Figure 31).

L'intérêt est de diversifier les zones de collecte :

- Différentes zones géographiques à l'échelle de la France ;
- Diversité de plantes cultivées ;
- Types de production (Grandes Cultures, maraîchage, ...) ;
- Systèmes de production (conventionnel avec des différents niveaux d'apport de fongicides, agriculture biologique, ...).

La recherche de candidats à partir des collectes est conduite selon une double approche :

La première approche fait appel à la microbiologie pasteurienne classique pour isoler des microorganismes (oomycètes et champignons) sur milieux gélosés à partir de fragments de plantes symptomatiques désinfectés en surface (Figure 31). Les microorganismes (oomycètes, champignons) associés aux symptômes seront isolés, purifiés et identifiés (essentiellement par des techniques de microbiologie et de microcopie à ce niveau). Une caractérisation phénotypique des microorganismes en culture sera effectuée dans un premier temps pour organiser la collection ainsi constituée.

La limite de cette méthode est qu'elle ne donne accès qu'à des microorganismes capables de se développer rapidement sur les milieux de cultures généralistes utilisés classiquement. Pour utiliser des milieux sélectifs ou électifs, il faut avoir connaissance des exigences écologiques des microorganismes recherchés.

La seconde approche propose d'évaluer la diversité de microorganismes (oomycètes et champignons) endophytes des adventices (Figure 31). Cette diversité peut être une source intéressante de taxons potentiellement pathogènes de ces plantes. Leur assignation taxonomique permettra d'optimiser la stratégie d'isolement (milieux appropriés) correspondant à leurs exigences écologiques, ou de rechercher des équivalents dans la collection de Microorganismes d'Intérêt Agronomique et Environnemental (MIAE) de l'UMR Agroécologie comprenant plusieurs milliers d'accessions fongiques et bactériennes. Outre l'accès à une source potentielle d'agent de biocontrôle des adventices sur lesquelles ils ont été identifiés, cette démarche innovante fournira des informations concernant la diversité microbienne susceptibles d'interagir sur les plantes adventices. Afin de mener à bien cette approche, il est nécessaire de collecter les parties aériennes d'adventices symptomatiques et non symptomatiques, et des cultures présentes dans les parcelles concernées par les prélèvements d'adventices.

Les outils de métagénomique maintenant disponibles permettront d'évaluer cette diversité. Il s'agit d'extraire l'ADN des différentes adventices symptomatiques et non symptomatiques, et des cultures des parcelles collectées. Il s'agira ensuite de cibler l'ADN des champignons et des oomycètes (déterminer les amorces spécifiques).

La recherche de candidats à partir de la bibliographie

La sélection de candidats microbiens phytopathogènes des adventices pourra aussi provenir de la recherche bibliographique. Une recherche dans la collection MIAE permettra de tester des microorganismes appartenant aux taxons repérés dans la littérature et donc potentiellement d'obtenir d'autres candidats à action herbicide.

Test de pathogénéité

Chaque candidat "microorganisme" est à tester prioritairement sur l'espèce dont il a été isolé (vérification des postulats de Koch) (Figure 31). Concrètement, il s'agit d'inoculer les microorganismes isolés sur un spécimen sain, de vérifier l'apparition de symptômes semblables à ceux observés sur la plante symptomatique collectée, de re-isoler pour chaque nouvelle plante symptomatique le microorganisme associé aux symptômes puis de vérifier que ce microorganisme est bien celui qui a été inoculé.

L'étape d'isolement peut conduire à l'obtention d'un grand nombre de candidats. Il s'agit pour la première étape du test de pathogénéité de disposer d'un test miniaturisé afin de réaliser un nombre important de tests en un minimum de temps et en occupant un minimum de place. Un test sur feuilles détachées a été développé ; il est conduit dans un système clos, type boîte plastique, avec des feuilles de papier filtre et de l'eau stérile au fond des boîtes pour garantir une hygrométrie importante. Pour mettre au point ce test, il a été choisi des pathosystèmes connus sur espèces cultivées, Maïs / *Colletotrichum graminicola*, pour les monocotylédones, et Chou / *Alternaria brassicicola*, pour les dicotylédones. Ces pathosystèmes seront utilisés comme témoins positifs de l'interaction plante-pathogène. Des feuilles seules (non inoculées) d'une part et un champignon non pathogène *Fusarium oxysporum* souche Fo47 seront utilisés comme témoins négatifs. Ces tests sont réalisés en enceinte climatique. La durée d'un test est d'environ une semaine. L'inoculation est réalisée par pulvérisation avec utilisation d'un co-formulant de type mouillant. A l'issue de cette première étape, seuls seront conservés les candidats qui ont une activité pathogène importante sur les plantes.

Pour la deuxième étape, les champignons sont re-isolés à partir des feuilles contaminées du test

précédent et inoculés cette fois sur des plantules conduites en serre. Elles seront cultivées en mini-serre permettant d'éviter les contaminations à l'échelle de la serre. Les candidats seront apportés par pulvérisation sur limbe des plantules. L'apparition de symptômes et le développement des plantes seront suivis pendant une à deux semaines. Seuls les candidats retenus à l'issue des différents tests bénéficieront d'une identification taxonomique complète (probablement par des approches de biologie moléculaire).

Caractériser leur spectre d'hôtes et de sélectivité

Les candidats qui représenteront les meilleurs potentiels seront sélectionnés sur des critères d'efficacité et de sélectivité (Figure 31). Ainsi à l'issue des tests de pathogénicité, les candidats présélectionnés seront testés en serre sur plantule pour un panel d'adventices afin de valider leur caractère bioherbicide et définir leur spectre d'efficacité sur différentes adventices. Des espèces cultivées seront également incluses dans le panel afin de définir le spectre de sélectivité des candidats (betterave sucrière, blé tendre d'hiver, carotte, chou, colza, laitue, maïs, melon, orge de printemps, pois protéagineux, soja, tabac, tomate et tournesol).

Déterminer une dose d'efficacité optimale

Une gamme de six à huit doses sera testée pour chaque candidat afin de déterminer la dose optimale pour l'action herbicide par espèce adventice sensible (Figure 31). Pour cette partie de l'étude, il est envisagé de développer en serre une méthodologie automatisée d'évaluation de la surface foliaire et de la biomasse des plantules d'adventices par prise de vue et analyse d'images sur la plateforme de phénotypage haut débit (PPHD) de l'UMR Agroécologie afin de quantifier l'effet herbicide des candidats sélectionnés.

Caractérisation du mode d'action

Le choix sera fait au moins dans un premier temps de rechercher des **métabolites d'intérêt** produits par les microorganismes. Cette approche donnera la possibilité à terme d'utiliser directement des métabolites en préparation formulée pour contrôler les adventices sans devoir appliquer les agents phytopathogènes dans l'environnement (Figure 31). La caractérisation de ces métabolites s'effectuera sur un petit nombre de candidats qui présentent le meilleur potentiel "herbicide" détecté au cours des étapes précédentes.

- Approche métabolomique

L'identification des candidats sera suivie par une caractérisation du mode d'action afin de mieux connaître les candidats et permettre le développement d'un produit de biocontrôle. En effet la connaissance du mode d'action d'un produit est importante afin de mieux appréhender les étapes suivantes de production, formulation et conditions d'application. Le choix est fait d'identifier des métabolites létaux produits par un champignon phytopathogène par une approche métabolomique avec pour objectif à plus long terme, l'utilisation des métabolites identifiés comme mycoherbicides. La métabolomique repose sur l'obtention d'extraits à partir d'échantillons plus ou moins complexes et l'utilisation de différentes méthodologies analytiques (la chromatographie liquide haute résolution (CHRL) couplée ou non à la spectrométrie de masse (SM) ou la résonance magnétique nucléaire (RMN)) pour caractériser les molécules.

La première étape est la mise au point des conditions de préparation des échantillons et des procédures d'extraction des métabolites. Il s'agit à ce niveau de tester différentes conditions de croissance des

champignons avec extraction avec différents solvants.

Dans l'hypothèse où le champignon produit des métabolites phytotoxiques de *manière constitutive*, il faut produire le champignon seul sur milieux solide ou en liquide. Plusieurs milieux pourront être testés (milieu minimum et riche). L'extraction sera réalisée avec différents solvants (par ex. acétate d'éthyle / acétonitrile / méthanol / eau). Ces solvants seront évalués pour leurs potentielles activités phytotoxiques.

Dans l'hypothèse où le champignon produit les métabolites phytotoxiques au cours de l'interaction agent pathogène-hôte (*par induction*), il faudra tester l'activité des extraits de champignons en interaction avec la plante hôte. Ces essais seront conduits avec l'espèce adventice sur laquelle le champignon a été isolé. Des prélèvements de feuilles infectées par le champignon seront réalisés à différents temps après l'inoculation du champignon. Puis les échantillons prélevés seront broyés et l'extraction des métabolites sera réalisée à partir du broyat. Plusieurs solvants seront également testés.

La deuxième étape consiste à tester les extraits obtenus. Ces essais permettront d'évaluer l'effet phytotoxique des extraits obtenus à l'étape précédente. Dans cette étape, une étude approfondie de l'interaction entre la plante et le microorganisme devra être réalisée pour déterminer les étapes clés de l'interaction phytopathogène. Ces étapes clés serviront à reconnaître l'état d'avancement de l'infection afin de synchroniser les prélèvements en vue de réaliser des extraits les plus reproductibles possibles (temps d'apparition des nécroses après traitement). Ainsi une cinétique d'infection sera réalisée avec des prélèvements avant la mort de la plante. Ces essais peuvent être réalisés sur feuilles détachées ou plantes entières. L'idéal serait de mettre au point des tests d'activités phytotoxiques miniaturisés et d'automatiser le suivi phénotypique. Les extraits seront testés en premier lieu sur l'espèce adventice sur laquelle le champignon a été isolé, puis sur d'autres adventices et des plantes cultivées.

La troisième étape est l'analyse comparative des extraits en vue d'identifier des métabolites candidats.

Après avoir mis au point la procédure d'extraction de métabolites fongiques, il s'agira de conduire une démarche comparative pour identifier les extraits fongiques associés à l'apparition des symptômes nécrotiques chez la plante hôte dans l'espace (différentes modalités telles que plante hôte infectée, plante hôte seule, champignon pathogène seul) et dans le temps (cinétique post infection). L'analyse des données produites pour les différentes modalités devra permettre de sélectionner les métabolites fongiques d'intérêt. Il s'agira à terme de purifier, plus ou moins partiellement, les métabolites identifiés et tester leur activité létale sur différents stades phénologiques de la plante hôte. Un éventuel effet combinatoire (un ou plusieurs métabolites en mélange) ainsi qu'un éventuel effet dose devront être pris en compte. La spécificité des métabolites létaux retenus sera ensuite testée sur une gamme de plantes appartenant à des espèces différentes de la plante hôte de l'agent pathogène.

- *Approche cytologique*

En complément à la découverte de métabolites, une étude cytologique pourra être conduite avec le centre de microscopie de l'UMR Agroécologie afin de caractériser le type d'interaction plante-hôte-microorganisme associé à la pathogénicité des candidats microbiens les plus prometteurs. Il s'agira de déterminer si les symptômes observés sont dus à une activité biotrophe de la part de l'agent pathogène qui utilise les cellules végétales comme ressource trophique pour assurer sa croissance dans la plante, ou bien si les symptômes observés sont dus à la production *in planta* par l'agent pathogène, d'une molécule capable de diffuser de manière systémique malgré une infection localisée et circonscrite par les réactions de défense de la plante. Cette étude fournira un argument pour sélectionner les candidats producteurs de

métabolites conduisant à la mort de la plante adventice.

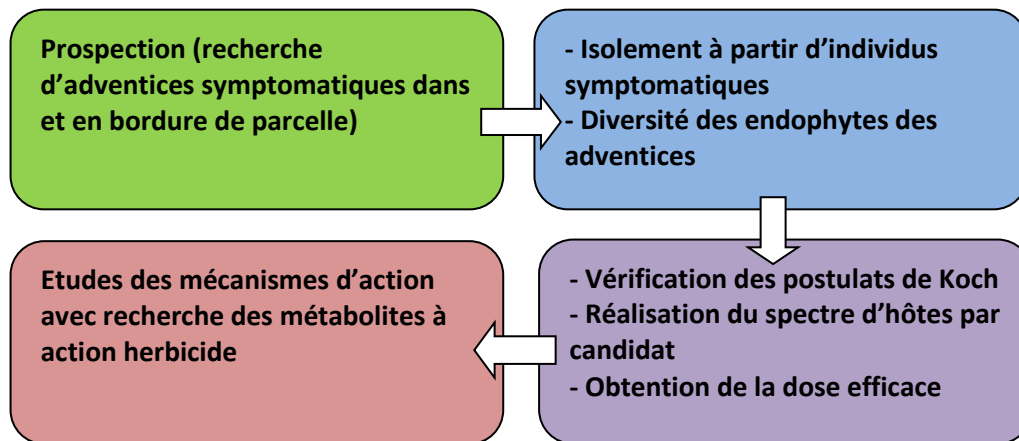


Figure 31 : Diagramme de flux représentant les différentes étapes de la recherche de candidats de type microorganisme épiphytes et endophytes à action herbicide.

VI.1.2.1.2 - Recherche de candidats pour les semences et plantules

Très peu de données existent sur les espèces fongiques impliquées dans le dépérissement des semences d'adventices et donc sur leurs potentialités de contrôle du stock semencier (Kremer, 1993 ; Kremer et Kennedy 1996 ; Chee-Sanford *et al.*, 2006 ; Wagner et Mitschunas, 2008 ; Müller-Stöver *et al.*, 2016). Malgré tout, il a déjà été montré qu'une augmentation de l'activité biologique des sols augmenterait la mortalité des semences adventices dans les sols (Gallandt *et al.*, 1999) ; ainsi certains micro-organismes dont des espèces fongiques pourraient être à l'origine de la mort de semences d'adventices stockées dans le sol (Davis *et al.*, 2006 ; Ullrich *et al.*, 2011).

Il peut s'agir d'espèces spécifiques des semences d'adventices, qui restent à identifier, ou de saprotrophes opportunistes capables d'hydrolyser les téguments externes des semences empêchant ainsi leur germination. Je me permets de rappeler que le stock semencier des adventices dans le sol d'une parcelle agricole est un facteur déterminant de la dynamique des populations de ces espèces (Ullrich *et al.*, 2011). La persistance des semences varie en fonction de l'espèce, du type de sol et des conditions environnementales. La présence d'un important stock semencier d'adventices dans les parcelles cultivées constitue un problème majeur de gestion des adventices.

Le sol est composé de différents compartiments dont **la spermosphère**. La spermosphère est la zone de sol entourant les semences et dans laquelle auraient lieu de nombreuses interactions, notamment pendant la phase de germination des semences du fait des exsudats plus nombreux qu'elles émettent à ce stade phénologique (Gómez *et al.*, 2014 ; Schiltz *et al.*, 2015). Peu d'études concernent la spermosphère des adventices ; toutefois c'est le cas par exemple de l'espèce de champignon *Pyrenophora seminiperda*, pathogène de plusieurs espèces de brome (*Bromus tectorum*, *Anisantha diandra*, *A. rubens* et *B. arvensis*) et qui présente des niveaux d'agressivité variables allant de la tolérance à la germination jusqu'à l'infection létale selon les espèces hôtes (Meyer *et al.*, 2008 ; Beckstead *et al.*, 2016). L'hypothèse est que **les champignons** et **les oomycètes** de part leur arsenal enzymatique diversifié peuvent contribuer à la gestion du stock semencier d'adventices en altérant les semences soit par une activité phytopathogène impliquant une éventuelle spécificité de l'interaction, soit par une activité saprotrophe très peu spécifique.

L'objectif sera de repérer, d'isoler et d'identifier des microorganismes capables d'affecter la germination des semences et la phase de mise en place des plantules d'adventices (ex. effet de fonte de

semis (destruction des plantules à la levée)). La spermosphère d'adventices n'a jamais été décrite ; cette étude fournira une première image de ce microenvironnement ainsi que de la diversité taxonomique et fonctionnelle qu'il héberge (ou pas ?) selon l'espèce végétale, et le sol et son histoire (système de culture).

La démarche proposée est la suivante et peut être décomposée en quatre étapes :

La première étape consiste à prélever des semences d'adventices dans des parcelles agricoles. Ces prélèvements seront réalisés i) dans des parcelles dans lesquelles le niveau de la flore adventice est faible ii) des parcelles dans lesquelles des fontes de semis fréquentes sont observées, iii) des parcelles riches en matière organique stimulant la microflore saprotrophe, iv) mais également des zones non agricoles dans lesquelles le turn-over de plantes diverses et donc de semences est important et propice au développement d'une microflore pathogène ou et saprotrophe adaptée. Il peut s'agir de zones anthropisées telles que les zones d'épandage des eaux de lavage des betteraves sucrières (présence d'une grande diversité de semences adventices et de microorganismes susceptibles de les utiliser comme ressources trophiques). Cette approche présentera le risque de ne pas collecter avec certitude la liste d'espèces adventices décidée préalablement et le nombre de semences souhaitées.

Pour palier à cette limite, une deuxième approche peut être mise en place avec les espèces non collectées en situation de parcelle agricole. Des semences d'espèces choisies à fort niveau de faculté de germination seront semées dans des séries de sols prélevés. La recherche de candidats se fera en priorité dans les sols à faible niveau d'émergence.

La deuxième étape est la recherche d'agents phytopathogènes des semences d'adventices. Les échantillons de sol seront tamisés et lavés pour éliminer une part importante de la terre et pour faciliter l'extraction et le tri des semences d'adventices présentes. Au cours de cette étape il faut extraire un nombre suffisant de semences d'adventices contenues dans le sol tout en cherchant à préserver au maximum les microorganismes fongiques associés à ces semences (ne pas trop nettoyer les semences). Des candidats de type endophytes des semences pourront également être recherchés. Dans ce cas, les semences doivent être désinfectées en surface puis blessées afin de permettre l'isolement des champignons endophytes.

Une approche Pasteurienne permettra à partir de semences d'adventices prélevées dans le stock semencier d'isoler des champignons et des oomycètes pathogènes de ces semences extraites. Dès qu'un champignon commence à se développer, celui-ci devra être repiqué individuellement. L'ajout de PCNB (pentachloronitrobenzène) au milieu permet de limiter le développement des mucorales, champignons opportunistes à développement rapide et qui n'ont pas d'action pathogène spécifique sur les semences.

La troisième étape consiste à caractériser l'activité des candidats en mettant en place des tests en conditions contrôlées afin d'estimer l'aptitude des différents isolats à inhiber la germination de semences ou le développement précoce de l'espèce d'origine (vérification des postulats de Koch) puis d'autres espèces végétales dont des espèces cultivées. Le large spectre d'hôtes des agents pathogènes responsables de fontes de semis tels que le champignon *Rhizoctonia solani* ou l'oomycète *Pythium irregulare* ou *P. ultimum* laisse à penser à une faible spécialisation des agents pathogènes des semences mais cela reste à vérifier. Cette remarque souligne l'importance de tester la spécificité vis-à-vis des semences de plantes cultivées. Ces tests permettront d'évaluer la notion de spécificité d'hôtes des agents pathogènes sur semences et sur plantules voire plantes installées.

Les candidats intéressants seront identifiés taxonomiquement (biologie moléculaire). Des candidats potentiels présents dans la collection MIAE de l'UMR pourront également être testés pour leurs effets sur la germination et l'émergence de semences d'adventices.

La quatrième étape aura pour objectif d'étudier les mécanismes mis en œuvre par les candidats sélectionnés pour attaquer et détruire les semences d'adventices. Parmi les mécanismes envisagés, le rôle des enzymes impliquées dans la dégradation de la matière organique d'une manière générale, communément appelées CAZymes (Carbohydrate-Active Enzymes), sera privilégié au moins dans premier temps (Pollard, 2018). Un des intérêts de travailler sur ces enzymes est qu'elles sont ordonnées en familles et répertoriées dans une base de données accessible (<http://www.cazy.org>) (Lombard *et al.*, 2014). Les champignons possèdent en moyenne plus d'une centaine de gènes différents codant des CAZymes mais la nature et la diversité de ces enzymes sont variables selon les espèces, le mode trophique et leur guildes fonctionnel (Talbot *et al.*, 2015). Il s'agira de comparer le profil enzymatique (CAZyme) d'agents pathogènes avérés et le profil enzymatique des candidats fongiques de la spermosphère capables de s'attaquer aux semences d'adventices.

VI.1.2.2 - Recherche de candidats *via* des études de co-occurrence de communautés

L'idée ici est de mettre en relation et de caractériser les liens entre deux compartiments de la biodiversité : la **diversité végétale**, composée des plantes cultivées et surtout de leurs cortèges d'adventices, et la **diversité des microorganismes du sol** (bactéries d'une part, et champignons et oomycètes d'autre part).

L'objectif est de repérer et d'identifier par l'étude des communautés microbiennes des sols des patrons de communautés voire des microorganismes qui interviennent voire assurent, d'une façon stable, une action de biocontrôle vis-à-vis d'adventices. Il apparaît pertinent de décrire la relation entre ces deux communautés car il est bien admis maintenant que celles-ci s'influencent mutuellement (Wardle *et al.*, 2004) : la flore *via* sa rhizosphère va influencer la communauté microbienne et cette dernière est en capacité d'impacter le développement et la croissance des espèces végétales.

Dans l'agroécosystème, les facteurs majeurs responsables de la distribution de la flore adventice commencent à être bien connus ; par ordre d'importance, le type de culture, l'efficacité des herbicides, le précédent cultural, le pH du sol et la texture du sol contribuent à expliquer la composition des communautés floristiques (Fried *et al.*, 2008). Pour la microflore, des études montrent un impact des facteurs environnementaux sur l'abondance et la structure génétique des communautés (Dequiedt *et al.*, 2009). Les communautés microbiennes du sol sont structurées spatialement en fonction des variations des facteurs du milieu et de leurs capacités de dispersion. Parmi les filtres environnementaux, le pH est identifié comme le filtre le plus important, particulièrement pour les espèces bactériennes (Fierer et Jackson, 2006). Néanmoins, d'autres facteurs sont structurants ; la texture du sol, le rapport C/N, le climat (Dequiedt *et al.*, 2009) et l'apport d'intrants (Toljander *et al.*, 2008). Les facteurs influençant ces deux types d'organismes (flores et microorganismes) sont donc de mieux en mieux connus, néanmoins l'interaction entre ces deux groupes d'organismes reste peu étudiée à des échelles communautaires.

Il s'agira de :

- décrire les diversités végétale et microbienne (bactéries et/ou champignons + oomycètes) du sol à l'échelle de la parcelle agricole ;
- comparer les profils de diversité afin de déterminer le niveau de lien entre diversité végétale et diversité microbienne du sol ;
- puis évaluer si les caractéristiques des sols et les pratiques agricoles influencent ce lien.

Quatre jeux de données sont donc nécessaires : la description des communautés adventices, des communautés microbiennes, les caractéristiques des sols et les pratiques culturales. Les deux types de communautés sont à caractériser par leur richesse spécifique et leur abondance.

Afin de créer les couples "communauté végétale/microbienne", il est indispensable de réaliser les prélèvements des échantillons de flores et de microorganismes telluriques dans la même zone (zone homogène) d'une parcelle ; ceci garantira que les deux communautés sont présentes dans le même type d'environnement et sont soumises aux mêmes pratiques culturales. Dans le cadre d'études des liens de co-occurrence entre communauté, l'analyse pourra être menée avec des indices de type similarité (Faust et Raes, 2012). Au moins dans premier temps, plusieurs d'entre eux pourront être testés : l'indice de Jaccard, de Sorensen, de Bray-Curtis...

Pour entreprendre ces études, l'UMR Agroécologie dispose d'expertises sur les communautés végétales adventices (le pôle GestAd) et sur les communautés de microorganismes telluriques (bactéries et champignons/oomycètes aussi bien nuisibles que bénéfiques (pôles BIOmE et IMP). Ces travaux pourront s'appuyer au moins dans un premier temps sur deux dispositifs type zone d'étude développés par l'UMR Agroécologie.

Il s'agit en premier lieu de la **mosaïque paysagère de Fenay (21)** (Figure 32) qui est utilisée pour l'étude de la diversité de la flore adventice des cultures (par le pôle GestAd) d'une part et pour l'étude des communautés microbiennes (actuellement bactérienne) du sol (par l'équipe BIOCUM "Distribution spatiale, dynamique et traduction fonctionnelle de la biodiversité des communautés microbiennes telluriques" du pôle BIOmE) d'autre part. Ces travaux ont déjà permis la constitution d'au moins une partie d'un jeu de données associant "flore adventice" et "microflore bactérienne du sol", auquel est associée une connaissance exhaustive de l'historique des parcelles de la mosaïque paysagère (successions des cultures et itinéraires techniques depuis 2004) et des caractéristiques physico-chimiques des sols.

Des relevés de flores adventices sont réalisés annuellement sur une majorité des parcelles agricoles dans une zone de plein champ de 2000 m² et sur une interface de la parcelle. La connaissance cumulée de la flore exprimée chaque année dans une parcelle et son interface permettra d'avoir accès à l'information « stock semencier » d'une parcelle.

En ce qui concerne la diversité bactérienne, un premier jeu de données a été constitué sur la zone de Fenay en 2011 indépendamment de la localisation des relevés des flores dans la cadre de la thèse de F. Constancias, qui a travaillé sur la distribution spatiale des communautés bactériennes telluriques de l'agrégat au paysage agricole. Une carte de la répartition de la communauté microbienne a été produite à l'échelle de la zone de Fenay et a révélé une répartition spatiale structurée de la biomasse microbienne et la diversité avec des patches de plusieurs centaines de mètre (Figure 33). L'abondance et la répartition microbiennes sont très dépendants des propriétés du sol (pH et texture) et de l'utilisation des terres.

Un deuxième jeu de données a été constitué à l'automne 2016 avec la mise en place d'un échantillonnage commun (même zone de la parcelle) pour les deux communautés (flore adventice et communautés bactériennes) s'appuyant sur 50 points de mesure (Figure 30). Les échantillons de terre qui ont permis d'obtenir la description des communautés bactériennes pourront également servir à décrire les communautés de champignons et oomycètes.

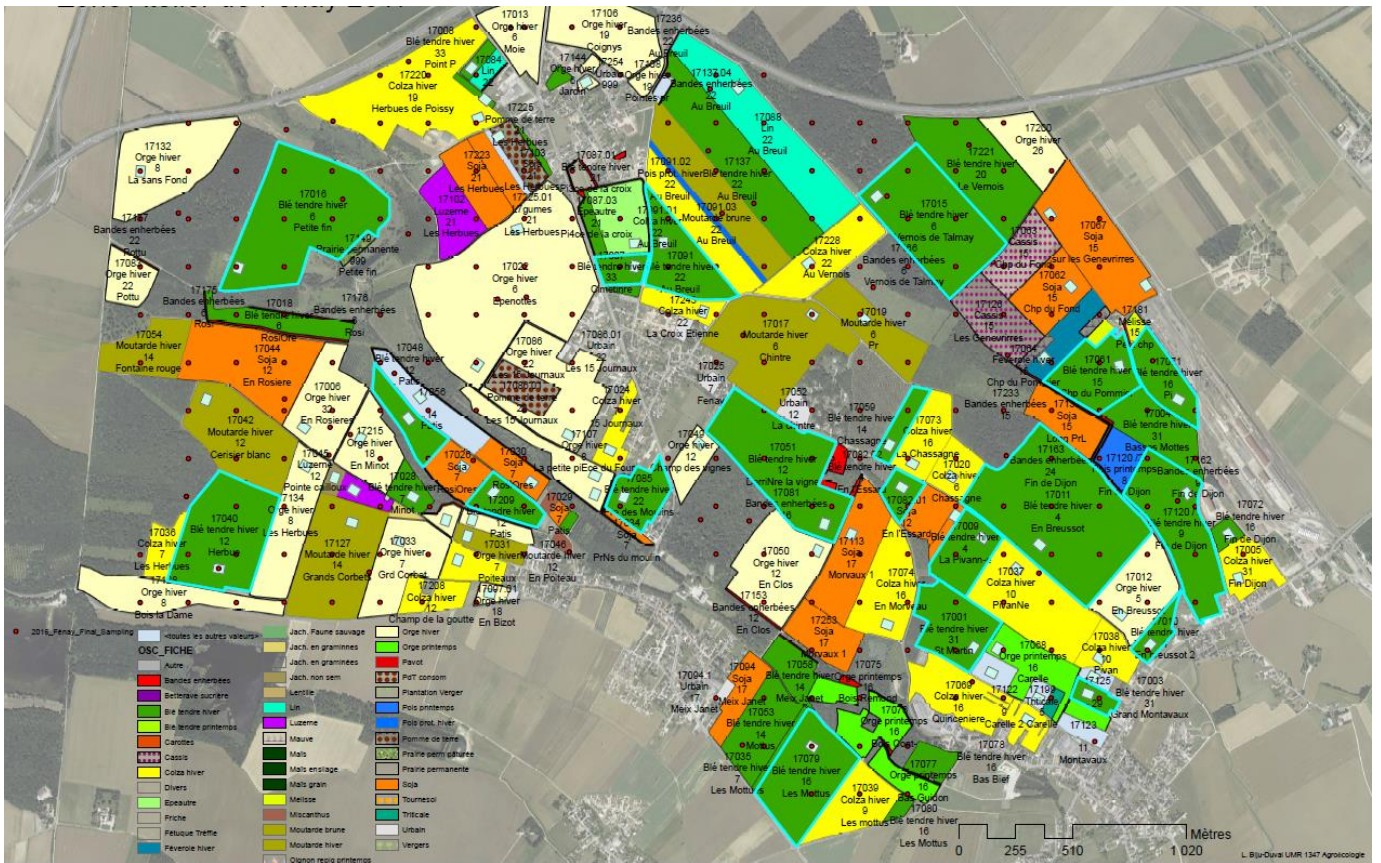


Figure 32 : Zone d'étude de Fenay pour la campagne culturelle 2016-17. Les rectangles blancs représentent les zones dans lesquelles la flore adventice est évaluée et les points rouge les points de prélèvements de sol pour lesquels la communauté bactérienne a été décrite.

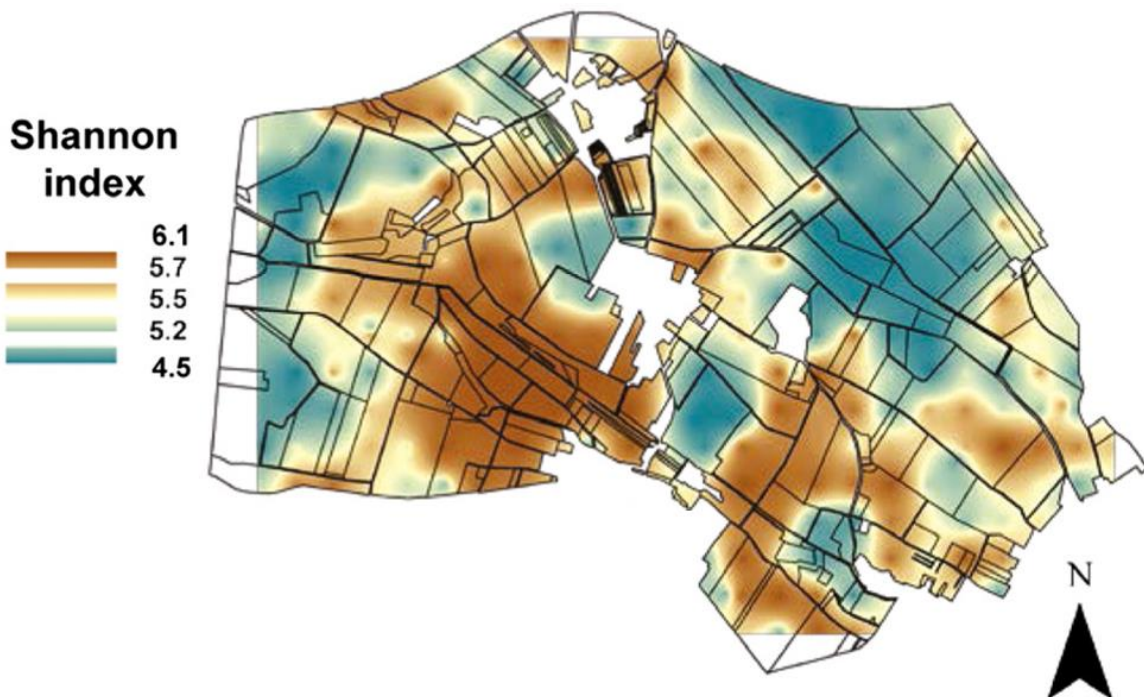


Figure 33 : Répartition de la diversité bactérienne mesurée en 2011 à l'échelle de la zone d'étude de Fenay [ACL32]

Le deuxième dispositif envisagé est la **plateforme CA-SYS** (Co-designed Agroecological System experiment); il s'agit d'une plateforme d'expérimentation collaborative en agroécologie à différentes échelles mise en place sur l'Unité Expérimentale de l'Inra de Dijon par l'UMR Agroécologie (responsables Stéphane Cordeau et Violaine Deytieux). Dans le cadre de sa mise en place, un état initial de la "composante" sol a été réalisé pour les 49 parcelles composant le dispositif (Figure 34). Pour chaque parcelle, plusieurs échantillons ont été prélevés (effectif fonction de la grille systématique établie à l'échelle du dispositif). Sur les échantillons prélevés, plusieurs mesures seront effectuées dont la caractérisation physico-chimique, la diversité microbienne et le stock semencier des espèces adventices. Les pratiques culturales sont connues sur ce dispositif.

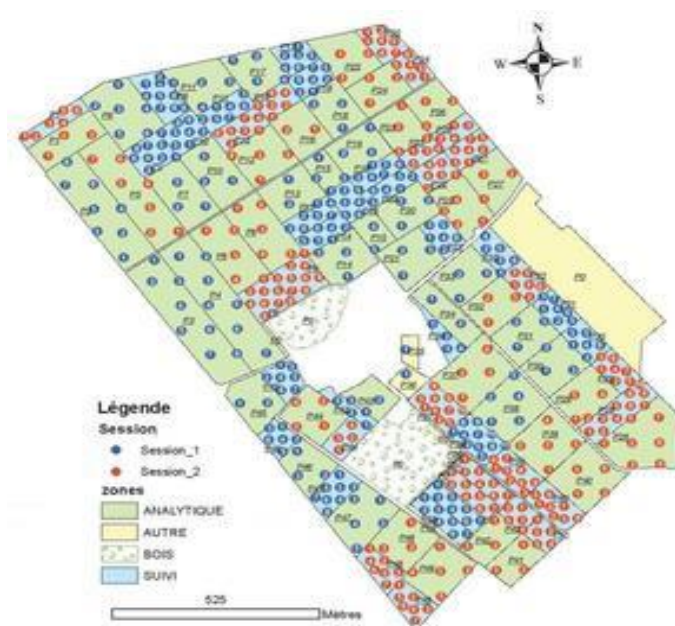


Figure 34 : Plan d'échantillonnage des prélèvements de terre réalisés sur l'ensemble du dispositif CA-SYS (Co-designed Agroecological System experiment).

Les jeux de données complets (flore, microorganismes, pratiques culturales et caractéristiques physico-chimiques des sols) ainsi constitués devront permettre d'étudier les relations entre diversité végétale et diversité microbienne afin de repérer les variations spatiales des communautés en lien avec les pratiques agricoles et les caractéristiques physico-chimiques des sols, et de repérer et identifier des communautés microbienne voire des microorganismes ayant une action vis-à-vis d'espèces adventices. De plus les connaissances des liens entre pratiques agricoles et structure de la communauté microbienne serviront de base au développement d'une ingénierie agro-écologique visant à identifier les combinaisons de pratiques agricoles qui favorisent le développement de communautés microbiennes multi-contrôlantes.

Dans un deuxième temps, une fois les méthodes d'analyse maîtrisées, l'étude de la co-occurrence entre communautés végétales adventices et communautés microbiennes pourra également être développée au regard de la composition des communautés microbiennes en bactéries et champignons/oomycètes. Le rapport entre bactéries et champignons composant la communauté microbienne du sol serait influencé par le niveau de perturbation de la parcelle (Bardgett *et al.*, 1996) ; en effet la communauté microbienne des sols perturbés (fertilisation, chaulage, pâturage, ...) serait dominée par les bactéries et la proportion de la communauté fongique augmenterait dans les sols moins perturbés. Il serait intéressant d'étudier si la composition de la communauté microbienne *via* son rapport bactérie/champignon-oomycète a une

influence sur la diversité et l'abondance de la communauté végétale adventice. En effet Chee-Sanford *et al.* (2006) suggèrent que les communautés fongiques auraient des actions plus spécifiques sur les espèces adventices.

Pour développer cette approche, il faudra explorer une série de systèmes de culture présentant une gamme de rapport bactérie/champignon-oomycète composant la communauté microbienne. Pour constituer le panel de situations, il faudra s'appuyer les dispositifs existants de l'UMR Agroécologie (zone d'étude de Fenay et plateforme CA-SYS) et ses partenariats (réseau d'agriculteurs en agriculture de conservation, réseau d'exploitation en agriculture biologique, ...), et se rapprocher d'autres dispositifs tels que le réseau de ferme DEPHY (Démonstration, Expérimentation et Production de références sur les systèmes économes en PHYtosanitaires), ...

VI.2 - Evaluation du stock de semences d'adventices

Pour le développement de nouveaux systèmes de culture, les agriculteurs doivent pouvoir disposer d'outils (**outils d'aide à la décision**) leur permettant d'optimiser leur prise de décisions. Dans le cadre de la gestion des adventices en particulier des espèces annuelles, il est bien admis que la production de semences et leur survie sont des caractéristiques biologiques importantes qui contribuent à leur dynamique. Le stock semencier des adventices dans le sol d'une parcelle agricole est donc un facteur déterminant de la dynamique des populations de ces espèces (Ullrich *et al.*, 2011). Dans les milieux agricoles, les populations d'adventices sont soumises à des pressions de sélection répétées dans le temps, qui sont extrêmes d'un point de vue intensité, et dont la nature est liée à la culture en place et aux prises de décision de l'agriculteur. Peu de populations végétales sont soumises à une telle fréquence et une telle intensité de perturbations ; les espèces adventices annuelles doivent pouvoir terminer de façon très rapide leur cycle de développement, tout en maximisant leur production de semences viables qui iront réintégrer pour une période plus ou moins longue le stock de semences (Figure 13).

La connaissance du stock de semences apparaît donc une information importante pour suivre la dynamique d'installation des populations adventices. On peut considérer que les espèces adventices sont essentiellement présentes sous forme de semences qui, le temps d'un cycle quelque fois très court, vont être visibles sous la forme d'une plantule puis parfois d'une plante adulte (Figure 13). Toutefois, l'échantillonnage des semences contenues dans le sol constitue un problème complexe tant d'un point de vue spatial (où échantillonner ? à quelle profondeur ?) que d'un point de vue temporel (avant le semis, en cours de saison ?), que d'un point de vue statistique (nombre de prélèvements, grille d'échantillonnage) avec de nombreuses difficultés techniques liées au lavage du sol, à la petite taille des semences, aux observations sous loupe, etc, pour réaliser des estimations fiables et donc exploitables pour être utiliser pour le développement d'un outil d'aide à la décision.

Le stock semencier est classiquement estimé à partir de prélèvements de carottes dans le sol. L'estimation du nombre de semences est en général déterminée après élimination de la terre et des débris végétaux. Ensuite l'estimation est réalisée soit par reconnaissance directe des semences sous loupe binoculaire soit à partir des plantules issues de la germination des semences prélevées dans les carottes de sol. Il s'agit d'opérations fastidieuses et chronophages.

La connaissance du stock permet d'informer sur la flore potentielle (composition et abondance) et d'identifier les espèces susceptibles de ne pas s'exprimer du fait de conditions environnementales défavorables (date de semis, déficit hydrique, ...). Cependant cet indicateur reste difficilement accessible et

utilisable par une approche simple (Forcella, 1992). Le coût en temps de travail et les problèmes d'échantillonnage limitent son utilisation en tant qu'outil prédictif. De nombreux facteurs peuvent aussi faire varier la distribution spatiale des semences des espèces au cours du temps, ce qui rend difficile la mise au point de protocoles généralisables pour ce type d'étude.

Développement d'une nouvelle méthode de caractérisation et d'évaluation du stock semencier

L'objectif du projet est de mettre au point des indicateurs moléculaires de caractérisation et d'évaluation du stock semencier dans les sols agricoles. *In fine* l'information ainsi obtenue devrait permettre aux agriculteurs d'avoir connaissance du stock semencier de leurs parcelles et de les aider à optimiser leurs interventions culturales de gestion des adventices. Le projet associe les compétences de la plateforme GenoSol (biologie moléculaire) et du pôle GestAd (malherbologie) de l'UMR Agroécologie. Son développement nécessitera un investissement pluriannuel de la mise au point de la technique aux tests en parcelles agricoles.

Le projet s'intéressera initialement à une vingtaine d'espèces d'adventices présentant des caractéristiques biologiques variées (mono ou dicotylédones, taille des semences, semences albuminée ou exalbuminée, ...) (Tableau 12). La liste d'adventices comporte une majorité d'espèces avec des semences de petite taille. En effet il s'agit des espèces les plus difficiles à détecter par les méthodes classiques d'évaluation du stock semencier. Ensuite la recherche de marqueurs de la viabilité et d'aptitude à la germination sera limitée à quelques espèces de la liste initiale.

La première étape du projet consistera à obtenir le génôme chloroplastique de la vingtaine d'espèces adventices. En premier lieu, une recherche des génômes déjà décrits sera réalisée dans les bases de données. Pour les espèces non décrites, les génômes chloroplastiques seront extraits et séquencés à partir de plantes mises en croissance sous conditions contrôlées (serre de la Plateforme de Phénotypage Haut débit (PPHD 4PMI) - UMR Agroécologie). La connaissance du génôme est indispensable pour mettre au point des marqueurs spécifiques. Les génômes seront assemblés pour être comparés entre eux. Pour ce projet, l'objectif premier est de déterminer des marqueurs spécifiques pour la vingtaine d'espèces adventices utilisées pour mettre au point un outil de détection moléculaire des adventices. L'extraction d'ADN sera réalisée par la plateforme GenoSol qui détient une expertise d'extraction de la ressource génétique dans les sols.

La détection des semences dans le stock par les méthodes moléculaires ne permet pas de déterminer si elles sont viables et/ou aptes à germer. Ainsi dans le projet, il est également envisagé de rechercher des marqueurs spécifiques de la viabilité et de l'aptitude à la germination des semences (marqueurs ARNm et microARN). Des lots de semences présentant différents niveaux de viabilité et de capacité à germer par espèce seront testés pour valider les marqueurs candidats. Les différents lots de semences seront issus de la carpothèque-séminothèque de l'UMR Agroécologie. L'obtention de tels marqueurs permettra de déterminer les proportions de semences viables / non viables constituant le stock semencier. L'approche sera expérimentale ; il s'agira de préparer des sols tamisés dans lesquels des quantités connues de semences auront été placées. Une modalité consistera à apporter des semences ayant subies un pré-traitement de germination (optimiser de la recherche des marqueurs de germination).

Les méthodes de détection mises au point seront testées dans des sols issus de zones d'étude coordonnées par l'UMR Agroécologie comme le dispositif CA-SYS (Plateforme d'expérimentation collaborative en agroécologie à différentes échelles) et la zone d'étude de Fenay au niveau desquels la répartition et le suivi des communautés adventice sont bien connus. Ces mesures sur des sols prélevés dans des parcelles agricoles permettront de valider le développement des indicateurs moléculaire de présence des adventices. Si un certain nombre de problèmes méthodologiques restent à être surmonter, ce projet innovant pourrait permettre de développer un nouvel outil pour caractériser la diversité floristique réelle des parcelles agricoles.

Tableau 12 : Liste des espèces adventices envisagées pour la mise au point de marqueurs moléculaires spécifiques. Les noms d'espèces soulignées ont des semences exalbuminées.

| Nom commun | Nom scientifique | Famille | Poids d'une semence en mg |
|-------------------------------------|---|------------------|---------------------------|
| Agrostide jouet des vents | <i>Apera spica-venti</i> | Poaceae | 0,1 |
| Amarante hybride | <i>Amaranthus hybridus</i> | Amaranthaceae | 0,38 |
| Amarante réfléchie | <i>Amaranthus retroflexus</i> | Amaranthaceae | 0,38 |
| <u>Ambrosie à feuille d'armoise</u> | <u><i>Ambrosia artemisiifolia</i></u> | Asteraceae | 4,59 |
| <u>Arabette de Thallus</u> | <u><i>Arabidopsis thaliana</i></u> | Brassicaceae | 0,02 |
| <u>Capselle bourse à pasteur</u> | <u><i>Capsella bursa-pastoris</i></u> | Convolvulaceae | 0,14 |
| Chénopode blanc | <i>Chenopodium album</i> | Chenopodiaceae | 0,56 |
| Coquelicot | <i>Papaver rhoeas</i> | Papaveraceae | 0,11 |
| Euphorbe réveil-matin | <i>Euphorbia helioscopia</i> | Euphorbiaceae | 2,5 |
| <u>Matricaire inodore</u> | <u><i>Tripleurospermum inodorum</i></u> | Asteraceae | 0,27 |
| Luzerne lupuline | <i>Medicago lupulina</i> | Fabaceae | 2 |
| Mouron des oiseaux | <i>Stellaria media</i> | Caryophyllaceae | 0,4 |
| Mouron rouge | <i>Lysimachia arvensis</i> | Primulaceae | 0,5 |
| <u>Myosotis des champs</u> | <u><i>Myosotis arvensis</i></u> | Boraginaceae | 0,19 |
| <u>Orobanche rameuse</u> | <u><i>Phelipanche ramosa</i></u> | Orobanchaceae | 0,01 |
| <u>Orobanche crénelée</u> | <u><i>Orobanche crenata</i></u> | Orobanchaceae | 0,01 |
| Pâturin annuel | <i>Poa annua</i> | Poaceae | 0,3 |
| Pensée des champs | <i>Viola arvensis</i> | Scrophulariaceae | 0,57 |
| Renouée des oiseaux | <i>Polygonum aviculare</i> | Polygonaceae | 1,52 |
| <u>Séneçon commun</u> | <u><i>Senecio vulgaris</i></u> | Asteraceae | 0,26 |
| Trèfle des champs | <i>Trifolium arvense</i> | Fabaceae | 0,8 |
| Véronique de Perse | <i>Veronica persica</i> | Scrophulariaceae | 0,67 |
| Vulpie queue-de-rats | <i>Vulpia myuros</i> | Poaceae | 0,83 |

VII. En terme de Discussion-Conclusion

Le projet vise à contribuer au développement de solutions de gestion des adventices permettant de réduire l'utilisation d'herbicides en production végétale. La thématique principale est la recherche et la caractérisation de microorganismes (majoritairement fongiques) ayant une activité de type herbicide sur les espèces adventices afin de concevoir des bioherbicides. Au regard de l'importance du marché des herbicides de synthèse mais des contraintes croissantes relatives à leur utilisation, et du faible développement des bioherbicides, il existe un intérêt majeur à conduire un projet de recherche pour identifier de tels candidats à activité herbicide. Il est envisagé de rechercher des solutions ciblant les semences d'adventices constituant le stock semencier présent dans le sol, et les adventices ayant germées et donc installées dans la parcelle.

Le nombre d'isolats microbiens et donc potentiels candidats à action herbicide est très variable d'une espèce végétale à une autre, de 10 pour *Conyza canadensis* (Duarte *et al.*, 2016) à 1 500 pour *Fallopia japonica* (Kurose *et al.*, 2012).

La recherche de ces microorganismes est un processus complexe et fastidieux nécessitant de nombreuses expérimentations pour déterminer et valider l'intérêt et donc l'efficacité (la virulence, l'agressivité, le spectre d'action, ...) de chaque candidat. Outre l'efficacité, d'autres critères doivent être estimés tels que les caractéristiques écologiques, les capacités à être produites en masse, à être stockées, à être formulées... (Ash, 2010). Plusieurs articles montrent le potentiel de différents microorganismes quand ils sont testés en conditions contrôlées. Par exemple une souche d'*Alternaria alternata* testée en condition contrôlée a pu réduire de 83% le poids sec aérien de *Chenopodium album*. Par contre lorsque la souche a été appliquée sur les plantes en parcelle cultivée, la majorité des conidies (86%) constituant l'inoculum n'a pas été retenue sur les feuilles ou n'a pas atteint la plante cible (Lawrie *et al.*, 2002) ; de telles observations peuvent conduire à l'abandon de candidats. Ce type de résultat met bien en évidence que le critère efficacité n'est pas le seul nécessaire à déterminer pour obtenir un candidat prometteur pour le développement commercial d'un bioherbicide (Ash, 2010).

En ce qui concerne les bioherbicides composés de microorganismes, des questions se posent sur les impacts de l'introduction d'inoculum microbien dans les agrosystèmes; comme la persistance et l'activité des inoculi microbiens dans les champs, l'aptitude écologique de ces inoculi à interagir avec les communautés déjà présentes dans l'environnement (microbiennes, insectes, ...) et avec certaines pratiques culturales (par ex. fertilisation, ...), l'adaptation des adventices (résistance aux agents pathogènes épandus)... Tous ces impacts seront à décrire et devront être pris en compte pour le développement de telles solutions. Afin de palier à ces contraintes liées à l'application de microorganismes vivants dans l'environnement, l'utilisation de métabolites phytotoxiques contre les adventices, imitant les approches herbicides de synthèse déjà utilisées, pourrait permettre d'accélérer le développement de telles solutions de contrôle des adventices.

Comme cela vient d'être évoqué, une alternative à l'application de microorganismes pathogènes peut être d'utiliser leurs métabolites phytotoxiques. Des souches de *Phoma chenopodicola* produisent du chenopodolan D et de la chénopodoline B en culture liquide à l'origine de symptômes de nécrose sur *Chenopodium album* (Cimmino *et al.*, 2013 ; Evidente *et al.*, 2015). Pour cet exemple, les toxines peuvent également provoquer des symptômes de nécrose sur les disques foliaires d'autres espèces adventices (Evidente *et al.*, 2015) ; ces toxines ne sont donc pas spécifiques de *C. album*. Il est intéressant de noter que certains métabolites phytotoxiques peuvent avoir un spectre d'hôte plus large que le champignon

phytopathogène qui les a produits.

Le spectre d'hôte est susceptible de varier d'un candidat à un autre (de spécifique à un hôte à de larges spectres d'hôtes). Pour les candidats à spectre étroit, il est envisageable d'affiner d'élargir leur spectre d'action de mélanger des souches dont les spécificités d'hôtes sont différentes et qui correspondent à des adventices co-occurentes dans un système de culture donné, ou d'associer des souches fongiques et des métabolites phytotoxiques secondaires d'origine microbienne et/ou végétale (Vurro *et al.*, 2012). Deux applications successives (stade 2 à 3 feuilles et 4 à 5 feuilles de l'adventice) d'un mélange comprenant 20% d'une émulsion d'huile de canola et une suspension de 10^7 conidies mL^{-1} d'*Alternaria alternata* ont été utilisées avec succès pour lutter contre *Rumex dentatus*, une adventice problématique du blé (*Triticum aestivum*) aux Philippines (Siddiqui *et al.*, 2010).

Dans le cadre du contrôle biologique, des solutions pourraient émerger de l'utilisation combinée de microorganismes, d'arthropodes, en particulier d'insectes, et de métabolites secondaires d'origine microbienne ou végétale (Willsey *et al.*, 2017). Une combinaison composée d'insectes s'attaquant aux racines (*Cyphocleonus* spp. et *Agapeta* spp.) et d'un champignon parasite tellurique (*Fusarium* spp.) d'origine européenne a été mise en place pour lutter contre *Centaurea maculosa* et *C. diffusa*, qui envahissent l'ouest des États-Unis et le Canada (Caesar *et al.*, 2002). Cette démarche pourrait également être envisagée qu'avec des organismes indigènes (démarche de lutte biologique de conservation) en faisant en sorte qu'un équilibre hôte-ensemble de parasites se développe avec le temps.

À l'échelle mondiale, l'offre de bioherbicides dérivés de microorganismes ou molécules naturelles est très faible. Les premiers bioherbicides ont été commercialisés dans les années 1980. Depuis 1980, le nombre de biopesticides a augmenté dans le monde mais la part des bioherbicides est restée très minoritaire (moins de 10% de tous les biopesticides) (Charudattan, 2001). Seulement quelques pays tels que les États-Unis, le Canada, l'Ukraine, ... commercialisent des bioherbicides (Bailey, 2014). Ces informations montrent que la conception et la commercialisation de bioherbicides à base de microorganismes ou molécules naturelles sont possibles. Toutefois jusqu'à présent la situation du marché des solutions herbicides était peu propice à leur développement.

L'évolution de la production agricole en particulier en Europe crée un environnement plus favorable au développement des produits de biocontrôle tels que les bioherbicides. Dans ce contexte, il est important que l'UMR Agroécologie maintienne et renforce sa position sur la thématique du biocontrôle. L'UMR prévoit dans ce contexte pour l'année 2019 de faire une demande à l'Inra, une des tutelles de l'UMR, d'un poste de chargé de recherche sur le thème du biocontrôle (contrôle des bioagresseurs des plantes cultivées en utilisant la diversité fongique).

La conception de produit de biocontrôle tels que les bioherbicides n'est pas une fin en soi. Dans le contexte actuel de rendre les systèmes de culture moins dépendants aux intrants de synthèse et doublement performants (productif et faible impact sur l'environnement), l'objectif est d'utiliser des techniques alternatives de gestion des adventices telles que l'application de produits de biocontrôle, puis de les intégrer dans les combinaisons de techniques culturales composant les nouveaux systèmes de culture.

Combiner plusieurs techniques culturales, comme la diversification des cultures, le travail du sol avant le semis et le désherbage mécanique conduit à une diminution de l'utilisation des herbicides de synthèse tout en maintenant un contrôle acceptable des adventices (Chikowo *et al.*, 2009). Les bioherbicides pourraient contribuer à augmenter à la fois l'efficacité de la lutte individuelle contre les adventices et

l'efficacité globale des systèmes culture pour gérer les communautés adventices.

L'utilisation de bioherbicides pourrait être combinée avec le désherbage mécanique dont il est admis qu'il ne permet qu'un contrôle partiel des adventices (Bonin *et al.*, 2010). Les bioherbicides pourraient contribuer au contrôle des adventices au cours des premiers stades de croissance de la culture lorsque le désherbage mécanique est trop risqué. Puis si nécessaire, une deuxième application de bioherbicides juste après le désherbage mécanique pourrait contrôler les cohortes d'aventices qui émergent souvent juste après le passage d'une houe rotative ou d'une bineuse (Melander *et al.*, 2005).

La persistance de semences d'aventices dans le stock semencier pourrait également être diminuée par l'application de bioherbicides composés d'agents qui ciblent les semences et/ou tous premiers stades de développement de la plante (voir la revue de Wagner et Mitschunas (2008)). Dans les systèmes de culture sans labour type agriculture de conservation, la gestion des adventices est très dépendante de l'utilisation d'herbicides. L'application de tels agents de biocontrôle pourrait être intéressante car les semences d'aventices sont concentrées dans la couche supérieure du sol (Yenish *et al.*, 1992 ; Clements *et al.*, 1996). De plus les conditions environnementales dans les horizons de surface en non labour sont décrites comme favorables (forte humidité (Blevins *et al.*, 1971) et température plus stable (Stoller et Wax, 1973)) aux microorganismes (en particulier champignon et oomycète). Une étape suivante serait d'orienter, en particulier par les pratiques culturales type travail du sol, la diversité des communautés microbiennes afin d'optimiser/maximiser la présence de groupes fonctionnels à activité herbicide, ...

Enfin, la gestion intégrée des adventices est aussi à mettre en place pour la maîtrise des espèces devenues résistantes aux herbicides ([ACL18]; Owen *et al.*, 2015). La résistance aux herbicides est maintenant très répandue chez de nombreuses espèces adventices problématiques (Moss *et al.*, 2011), amplifiée par la dépendance croissante à un nombre limité de substances actives autorisées ([ACL23]). Ainsi les bioherbicides devraient être un outil supplémentaire pour diversifier la pression de sélection exercée sur les adventices.

Bibliographie

- Agreste, 2014. Les traitements phytosanitaires en 2014. http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/dossier36_traitements.pdf
- Altieri M.A., Whitcomb W.H., 1979. The potential use of weeds in manipulation of beneficial insects. *Horticultural Science* **14**, 12-18.
- Anonymous, 2008. Plan Ecophyto 2018 de réduction des usages de pesticides 2008 –2018. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Paris, 21 p.
- Arnold C.Y., 1959. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *American Society for Horticultural Science* **74**, 430-445.
- Ash G.J., 2010. The science, art and business of successful bioherbicides. *Biological Control* **52**, 230-240.
- Assemat L., Allirand J.M., 1995. Une méthode d'analyse de la compétition pour la lumière dans un maïs enherbé. *XVIème Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. ANPP Annales, Tome I, 307-314.
- Aymonin G., 1962. Les messicoles vont-elles disparaître ? *Science et Nature* **49**, 3-9.
- Bailey K.L., 2014. The Bioherbicide Approach to Weed Control Using Plant Pathogens, Integrated Pest Management: Current Concepts and Ecological Perspective, Dharam P. Abrol ed. Elsevier (Academic Press). 245–266
- Bain C., Bernard J.-L., Fougeroux A., 2010. Histoire de la protection des cultures de 1850 à nos jours. Champ Libre, Paris. 255 p.
- Ballaré C.L., Casal J.J., 2000. Light signals perceived by crop and weed plants. *Field Crop Research* **67**, 149-160.
- Banovetz S.J., Scheiner S.M., 1994. The effects of seed mass on the ecology of *Coreopsis lanceolata*. *American Midland Naturalist* **131**, 65-74
- Bàrberi P., Lo Cascio B., 2001. Long-term tillage and crop rotation effects on weed seedbank size and composition. *Weed Research* **41**, 325-340.
- Bardgett R.D., Hobbs P.J., Frostegård Å., 1996. Change in soil fungal:bacterial ratios following reductions in the intensity of management of an upland grassland. *Biology and Fertility of Soils* **22**, 261-264.
- Baron Y., 1989. Élément pour un bilan de la flore messicole en Poitou-Charentes. Plantes sauvages menacées. Actes Brest. 79-86.
- Barralis G., Chadoeuf R., Lonchamp J.P., 1988. Longévité des semences de mauvaises herbes annuelles dans un sol cultivé. *Weed Research* **28**, 407-418.
- Barzman M., Dachbrodt-Saaydeh S., 2011. Comparative analysis of pesticide action plants of five European countries. *Pest Management Science* **67**, 1481-1485.
- Barzman M., Lamichhane J.R., Booij K., Boonekamp P., Desneux N., Huber L., Kudsk P., Langrell S.R.H., Ratnadass A., Ricci P., Sarah J.-L., Messean A., 2015. Research and development priorities in the face of climate change and rapidly evolving pests. *Sustainable Agriculture Reviews* **17**, 1-27.
- Baskin C.C., Baskin J.M.M., 2014. Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination, 2nd Edn. Academic Press, San Diego, CA, USA.
- Beckstead J., Meyer S.E., Ishizuka T.S., McEvoy K.M., Coleman C.E., 2016. Lack of Host Specialization on Winter Annual Grasses in the Fungal Seed Bank Pathogen *Pyrenophora semeniperda*. *Plos One* **11**, 20 p. doi:10.1371/journal.pone.0151058.
- Benvenuti S., Macchia M., 1993. Calculation of threshold temperature for the development of various weeds. *Agricoltura Mediterranea* **123**, 252-256.
- Benvenuti S., Macchia M., Miele S., 2001. Quantitative analysis of emergence of seedlings from buried weed seeds with increasing soil depth. *Weed Science* **49**, 528-535.
- Blatchley W. S., 1912. The Indiana weed book. Nature Publishing Company, Indianapolis.
- Blevins R., Cook D., Phillips S., Phillips R., 1971. Influence of no-tillage on soil moisture. *Agronomy Journal* **63**, 593-596.
- Bliss D., Smith H., 1985. Penetration of light into soil and its role in the control of seed germination. *Plant, Cell and Environment* **8**, 475-483.
- Bonhomme R., 1993. The solar radiation: characterization and distribution in the canopy. In : Crop

- structure and light microclimate. Inra, Paris. 17-28.
- Bonin L., Deswartes J.-C., Lieven J., Royer C., Muchembled C., 2010. Quelle efficacité du désherbage mécanique ? *Perspectives Agricoles* **369**, 21-28.
- Bradford J.K., 2002. Applications of hydrothermal time to quantifying and modelling seed germination and dormancy. *Weed Science* **50**, 248-260.
- Brewster J.L., 1990. Physiology and crop growth and bulbing. In : Onions and allied crops, Volume I : Botany, Physiology, and Genetics (eds Rabinowitch H.D. & Brewster J.L.). CRC Press, Boca Raton, Florida. 53-88.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Dürr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Mchet J.-M., Meynard J.-M., Delécolle R., 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* **18**, 311-346.
- Caesar A.J., Campobasso G., Terragitti G., 2002. Identification, pathogenicity and comparative virulence of *Fusarium* spp. associated with insect-damaged, diseased *Centaurea* spp. in Europe. *BioControl* **47**, 217-229.
- Cardina J., Johnson G.A., Sparrow D.H., 1997. The nature and consequence of weed spatial distribution. *Weed Science* **45**, 364-373.
- Caussanel J.-P., 1989. Nuisibilité et seuil de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelle : situation de concurrence bispécifique. *agronomie* **9**, 219-240.
- Champeaux C., 2006. Recours à l'utilisation de pesticides en grandes cultures. Evolution de l'indicateur de fréquence de traitement au travers des enquêtes « Pratiques Culturelles » du SCEES entre 1994 et 2001. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche & INRA, Paris. 101 p.
- Champeaux C., 2007. Recours à l'utilisation de pesticides en grandes cultures. Évolution de l'indicateur de fréquence de traitement au travers des enquêtes « Pratiques Culturelles » du Scees. Guide technique : algorithme de calcul de l'IFT à partir de données PK du Scees et PHY2X, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. Inra - UMR 211 Agronomie, 72 p.
- Chancellor R.J., 1986. Decline of arable weed seeds during 20 years in soil under grass and the periodicity of seedling emergence after cultivation. *Journal of Applied Ecology* **23**, 631-637.
- Charudattan R., 2001. Biological control of weeds by means of plant pathogens: Significance for integrated weed management in modern agro-ecology. *BioControl* **46**, 229-260.
- Chauvel B., Munier-Jolain N.M., Grandgirard D., Gueritain G., 2002. Effect of vernalization on development and growth within black-grass population (*Alopecurus myosuroides* Huds.). *Weed Research* **42**, 166-175.
- Chaux C., Foury C., 1994. Production Légumières, Tome 2 : Légume feuilles, tiges, fleurs, racines, bulbes. Lavoisier TEC & DOC, Paris, 639 p.
- Chee-Sanford J.C., Williams II M.M., Davis A.S., Sims G.K., 2006. Do microorganisms influence seed-bank dynamics? *Weed Science* **54**, 575-587.
- Chikowo R., Faloya V., Petit S., Munier-Jolain N.M., 2009. Integrated Weed Management systems allow reduced reliance on herbicides and long-term weed control. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **132**, 237-242.
- Cimmino A., Andolfi A., Zonno M.C., Avolio F., Santini A., Tuzi A., Berestetskyi A., Vurro M., Evidente A., 2013. Chenopodolin: A Phytotoxic Unrearranged *ent*-Pimaradiene Diterpene Produced by *Phoma chenopodicola*, a Fungal Pathogen for *Chenopodium album* Biocontrol. *Journal of Natural Products* **76**, 1291-1297.
- Clements D.R., Benott D.L., Murphy S.D., Swanton C.J., 1996. Tillage effects on weed seed return and seedbank composition. *Weed Science* **44**, 314-322.
- Colbach N., Busset H., Yamada O., Dürr C., Caneill J., 2006. AlomySys: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate II. Evaluation. *European Journal of Agronomy* **24**, 113-128.
- Colbach N., Collard A., Guyot S.H.M., Mézière D., Munier-Jolain N.M., 2014. Assessing innovative sowing patterns for integrated weed management with a 3D crop:weed competition model. *European Journal of Agronomy* **53**, 74-89.

- Craufurd P.Q., Wheeler T.R., 2009. Climate change and the flowering time of annual crops. *Journal of Experimental Botany* **60**, 2529-2539.
- Davis A.S., Anderson K.I., Hallett S.G., Renner K.A., 2006. Weed seed mortality in soils with contrasting agricultural management histories. *Weed Science* **54**, 291-297.
- de Candolle, 1832, *Physiologie Végétale ou Exposition des forces et des fonctions vitales des végétaux*, Tome 3, Chapitre XV, page 1476-1477
- de Gournay X., 1963. La lutte contre le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides* Huds.) dans les cultures de blé d'hiver. *Annales de Physiologie Végétale* **5**, 229-247.
- de Raunkiaer C., 1934. *The life forms of plants and statistical plant geography*. Oxford University Press, Oxford (Great Britain). 632 p.
- Délye C., Jasieniuk M., Le Corre V., 2013. Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds. *Trends in Genetics* **29**, 649-658.
- Denieul C., 2013. Est-il encore nécessaire de désherber ? *XXIIème Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la lutte contre les Mauvaises Herbes*. Dijon, France, 10 au 12 Décembre 2013.
- Dequiedt S., Thioulouse J., Jolivet C., Saby N.P.A., Lelievre M., Maron P.A., Martin M.P., Chemidlin Prévost-Bouré N., Toutain B., Arrouays D., Lemanceau P., Ranjard L., 2009. Biogeographical patterns of soil bacterial communities. *Environmental Microbiology Reports* **1**, 251-255.
- Deravel J., Krier F., Philippe J., 2014. Les biopesticides, compléments et alternatives aux produits phytosanitaires chimiques (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* **18**, 220-232.
- Doneen L.D., MacGillivray J.H., 1943. Germination (emergence) of vegetable seed as affected by different soil moisture conditions. *Plant Physiology* **18**, 524-529.
- Duarte L.L., Santos F.M.C., Barreto R.W., 2016. Mycobiota of the weed *Conyza canadensis* (Asteraceae) in Brazil. *Fungal Biology* **120**, 1118-1134.
- Duke S., Dayan F., Romagni J., Rimando A., 2000. Natural products as sources of herbicides: current status and future trends. *Weed Research* **40**, 99-111.
- Estrella N., Sparks T.H., Menzel A., 2007. Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology* **13**, 1737-1747
- Evidente A., Cimmino A., Zonno M.C., Andolfi A., Masi M., Berestetskyi A., Santoro E., Superchi S., Vurro M., Evidente A., 2015. Phytotoxins produced by *Phoma chenopodiicola*, a fungal pathogen of *Chenopodium album*. *Phytochemistry* **117**, 482-488.
- Fahad S., Hussain S., Chauhan B.S., Saud S., Wu C., Hassan S., Tanveer M, Jan A., Huang J., 2015. Weed growth and crop yield loss in wheat as influenced by row spacing and weed emergence times. *Crop Protection* **71**, 101-108.
- Faust K., Rase J., 2012. Microbial interactions: from networks to models. *Nature Reviews Microbiology* **10**, 538-550.
- Fenner M., Thompson K., 2005. *The ecology of seeds*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Fickett N.D., Boerboom C.M., Stoltenberg D.E., 2013. Soybean yield loss potential associated with early-season weed competition across 64 site-years. *Weed science* **61**, 500-507.
- Fierer N., Jackson R.B., 2006. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *PNAS* **103**, 626-631.
- Florez J.A., Fischer A.J., Ramirez H., Duque M.C., 1999. Predicting rice yield losses caused by multispecies weed competition. *Agronomy Journal* **91**, 87-92.
- Forcella F., 1992. Prediction of weed seedling densities from buried seed reserves. *Weed Research* **32**, 29-38.
- Forcella F., 1998. Real-time assessment of seed dormancy and seedling growth for weed management. *Seed Science Research* **8**, 201-209.
- Fried G., Norton L.R., Reboud X., 2008. Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **128**, 68-76.
- Fried G., Petit S., Dessaint F., Reboud X., 2009. Arable weed decline in Northern France: Crop edges as refugia for weed conservation? *Biological Conservation* **142**, 238-243.
- Gallandt E.R., Liebman M., Huggins D.R., 1999. Improving soil quality: Implications for weed management. *Journal of Crop Production* **2**, 95-121.

- Gardarin A., Colbach N., 2015. How much of seed dormancy in weeds can be related to seed traits? *Weed Research* **55**, 14-25.
- Gardarin A., Dürr C., Colbach N., 2009. Which model species for weed seedbank and emergence studies? A review. *Weed Research* **49**, 117-130.
- Gasquez J., 2005. Les adventices, composante inhérente des cultures. *Livre Blanc « Gestion Responsable des Herbicides Céréales »* (Ed. Bayer Crop Science), Lyon, France. 9-15.
- Gazdag Torma M., 1997. Competition between weeds and onions grown from seedling bulbs. *Növényvédelem* **33**, 57-61.
- Ghorbani R., Leifert C., Seel W., 2005. Biological control of weeds with antagonistic plant pathogens. *Advances in Agronomy* **86**, 191-225.
- Girardin P., 2000. Ecophysiologie du maïs. AGPM, Paris, France.
- Gómez R., Liebman M., Munkvold G., 2014. Weed seed decay in conventional and diversified cropping systems. *Weed Research* **54**, 13-25.
- Gouache D., Le Bris X., Bogard M., Deudon O., Page C., Gate P., 2012. Evaluating agronomic adaptation options to increasing heat stress under climate change during wheat grain filling in France. *European Journal of Agronomy* **39**, 62-70.
- Grundy A.C., Phelps K., Reader R.J., Burston S., 2000. Modelling the germination of *Stellaria media* using the concept of hydrothermal time. *New Phytologist* **148**, 433-444.
- Gummerson R.J., 1986. The effect of constant temperatures and osmotic potentials on the germination of sugar beet. *Journal of Experimental Botany* **37**, 729-741.
- Harding D.P., Raizada M.N., 2015. Controlling weeds with fungi, bacteria and viruses: a review. *Frontiers in Plant Science* **6**, 14 p. article 659. doi: 10.3389/fpls.2015.00659.
- Harper J.L., Lovell P.H., Moore K.G., 1970. The shapes and sizes of seeds. *Annual Review of Ecology and Systematics* **1**, 327-356.
- Hasan S., 1972. Specificity and host specialization of *Puccinia chondrillina*. *Annals of Applied Biology* **72**, 257-263.
- Herth A., 2011. Le bio-contrôle pour la protection des cultures 15 recommandations pour soutenir les technologies vertes. In: Ministère de l'Agriculture, de l'Industrie Agroalimentaire, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire (Ed.). 156 p.
- Hillocks R.J., 1998. The potential benefits of weeds with reference to small holder agriculture in Africa. *Integrated Pest Management Reviews* **3**, 155-167
- Hinz H.L., Schwarzländer M., Gassmann A., Bourchier R.S., 2014. Successes We May Not Have Had: A Retrospective Analysis of Selected Weed Biological Control Agents in the United States. *Invasive Plant Science and Management* **7**, 565-579.
- Holland J., Hutchison M., Smith B., Aebischer N., 2006. A review of invertebrates and seed-bearing plants as food for farmland birds in Europe. *Annals of Applied Biology* **148**, 49-71.
- IFEN, 2010. L'environnement en France – chapitre eau - www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/uploads/media/ree2010_eau_01.pdf. 19-26.
- Inserm, 2013. Pesticides – Effets sur la santé. Expertise collective, Synthèse et recommandations. 146 p.
- Jauzein P., 1995. Flore des champs cultivés. *INRA Edition*, 898 p.
- Jensen P.K., 2009. Longevity of seeds of four annual grass and two dicotyledon weed species as related to placement in the soil and straw disposal technique. *Weed Research* **49**, 592-601.
- Kiniry J.R., Williams J.R., Gassman P.W., Debaeke P., 1992. A general, process-oriented model for two competing plant species. *Transactions of the ASAE* **35**, 801-810.
- Knezevic S.Z., Datta A., 2015. The critical period for weed control: revisiting data analysis. *Weed Science* **63**, 188-202.
- Kremer R.J., 1993. Management of weed seed banks with microorganisms. *Ecological Applications* **3**, 42-52.
- Kremer R.J., Kennedy A.C., 1996. Rhizobacteria as biocontrol agents of weeds. *Weed Technology* **10**, 601-609.
- Kropff M.J., 1993. Eco-physiological models for crop-weed competition. In : Kropff M.J., van Laar H.H., Modelling crop-weed interactions, CAB International, Oxon, UK. 25-32.
- Kropff M.J., Spitters J.T., 1991. A simple model of crop loss by weed competition from early observations on relative leaf area of the weeds. *Weed Research* **31**, 97-105.

- Kurose D., Furuya N., Tsuchiya K., Tsuchima S., Evans H.C., 2012. Endophytic fungi associated with *Fallopia japonica* (Polygonaceae) in Japan and their interactions with *Puccinia polygoni-amphibii* var. *tovariae*, a candidate for classical biological control. *Fungal Biology* **116**, 785-791.
- Landis D.A., Wratten S.D., Gurr G.F., 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology* **45**, 175-201.
- Lawrie J., Greaves M.P., Down V.M., Western N.M., Jaques S.J., 2002. Investigation of Spray Application of Microbial Herbicides Using *Alternaria alternata* on *Amaranthus retroflexus*. *Biocontrol Science and Technology* **12**, 469-479.
- Letouzé A., Gaquez J., 2001. Inheritance of fenoxaprop-P-ethyl resistance in a blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) population. *Theoretical and Applied Genetics* **103**, 288-296.
- Lombard V., Golaconda Ramulu H., Drula E., Coutinho P.M., Henrissat B., 2014. The carbohydrate-active enzymes database (CAZy) in 2013. *Nucleic Acids Research* **42**, 490-495.
- Lucas P., 2007. Le concept de la protection intégrée des cultures. *Innovations agronomiques* **1**, 15-21.
- Lutman P.J.W., Bowerman P., Palmer G.M., Whytock G.P., 2000. Prediction of competition between oilseed rape and *Stellaria media*. *Weed Research* **40**, 255-269.
- Marshall E. J. P., Brown V. K., Boatman N. D., Lutman P. J. W., Squire G. R., Ward L. K., 2003. The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields. *Weed Research* **43**, 77-89.
- Masin R., Loddo D., Benvenuti S., Zuin M.C., Macchia M., Zanin G., 2010. Temperature and water potential as parameters for modeling weed emergence in Central-Northern Italy. *Weed Science* **58**, 216-222.
- Mead J., Chan K., 1988. Effect of deep tillage and seedbed preparation on the growth and yield of wheat on a hard-setting soil. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **28**, 491-498.
- Melander B., Rasmussen I.A., Bàrberi P., 2005. Integrating physical and cultural methods of weed control - examples from European research. *Weed Science* **53**, 369-381.
- Meyer S.E., Beckstead J., Allen, P.S., Smith D.C., 2008. A seed bank pathogen seedborne disease: *Pyrenophora semeniperda* on undispersed grass seeds in western North America. *Canadian Journal of Plant Pathology* **30**, 525-533.
- Meyer S., Wesche K., Krause B., Leuschner C., 2013. Dramatic losses of specialist arable plants in Central Germany since the 1950s/60s - a cross-regional analysis. *Diversity and Distributions* **19**, 1175-1187.
- Milberg P., Hallgren E., 2004. Yield loss due to weeds in cereals and its large-scale variability in Sweden. *Field Crops Research* **86**, 199-209.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC.
- Mondal M.F., Brewster J.L., Morris G.E.L., Butler H.A., 1986. Bulb development in onion III. Effects of the size of adjacent plants, shading by neutral and leaf filters, irrigation and nitrogen regime and the relationship between the red: far-red spectral ratio in the canopy and leaf area index. *Annals of Botany* **58**, 207-219.
- Moss S.R., 1990. Herbicide cross resistance in Slender Foxtail (*Alopecurus myosuroides*). *Weed Science* **38**, 492-496.
- Moss S.R., Marshall R., Hull R., Alarcon-Reverte R., 2011. Current status of herbicide-resistant weeds in the United Kingdom. *Aspects of Applied Biology - Crop Protection in Southern Britain* **106**, p 1-10.
- Müller-Schärer H., Frantzen J., 1996. An emerging system management approach for biological weed control in crops: *Senecio vulgaris* as a research model. *Weed Research* **36**, 483-491.
- Müller-Stöver D., Nybroe O., Baraibar B., Loddo D., Eizenberg H., French K., Sønderskov M., Neve P., Peltzer D.A., Maczey N., Christensen S., 2016. Contribution of the seed microbiome to weed management. *Weed Research* **55**, 335-339.
- Oerke E.C., 2006. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science* **144**, 31-43.
- Oerke E.C., Dehne H., 1997. Global crop production and the efficacy of crop protection - Current situation and future trends. *European Journal of Plant Pathology* **103**, 203-215.
- Olivereau F., 1996. Les plantes messicoles des plaines françaises. *Courrier de l'Environnement* **28**, 5-18.
- Olson S., 2015. An Analysis of the Biopesticide Market Now and Where it is Going. *Outlooks on Pest Management* **26**, 203-206.
- Owen M.D., Beckie H.J., Leeson J.Y., Norsworthy J.K., Steckel L.E., 2015. Integrated pest management and weed management in the United States and Canada. *Pesticide Management Science* **71**, 357-376.

- Petit C., Arnal H., Darmency H., 2015a. Effects of fragmentation and population size on the genetic diversity of *Centaurea cyanus* (Asteraceae) populations. *Plant Ecology and Evolution* **148**, 191-198.
- Petit S., Munier-Jolain N., Bretagnolle V., Bockstaller C., Gaba S., Cordeau S., Lechenet M., Mézière D., Colbach N., 2015b. Ecological Intensification through Pesticide Reduction: Weed Control, Weed Biodiversity and Sustainability in Arable Farming. *Environmental Management* **56**, 1078-1090.
- Pollard A.T., 2018. Seeds vs fungi: an enzymatic battle in the soil seedbank. *Seed Science Research* **28**, doi.org/10.1017/S0960258518000181
- Porcher E., Lande R., 2005. Loss of gametophytic self-incompatibility with evolution of inbreeding depression. *Evolution* **59**, 46-60.
- Pousset J., 2003. *Agricultures sans herbicides. Principes et methods.* France Agricole Editions. 703 p.
- Primot S., Valentin-Morison M., Makowski D., 2006. Predicting the risk of weed infestation in winter oilseed rape crops. *Weed Research* **46**, 22-33.
- Quinlan R.J., Lisansky S.G., 2013. *Asia, Australasia, Latin America, Africa and the Middle East: Biopesticides Market.* CPL Business Consultants. Wallington, Oxfordshire, United Kingdom. 12 p.
- Rajcan I., Swanton C. J., 2001. Understanding maize–weed competition: resource competition, light quality and the whole plant. *Field Crops Research* **71**, 139-150
- Rizvi P.Q., Ahmad S.K., Choudhury R.A., Arshad A., 2012. Biopesticides in ecologically-based integrated pest management. In: Abrol D.P., Shankar U., *Integrated pest management: principles and practice*, CAB International. 133-161.
- Robinson R.A., Sutherland W.J., 2002. Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. *Journal of Applied Ecology* **39**, 157-176.
- Saatkamp A., Affre L., Dutoit T., Poschlod P., 2009. The seed bank longevity index revisited: limited reliability evident from a burial experiment and database analyses. *Annals of Botany* **104**, 715-724.
- Saatkamp A., Affre L., Dutoit T., Poschlod P., 2011. Germination traits explain soil seed persistence across species: the case of Mediterranean annual plants in cereal fields. *Annals of Botany* **107**, 415–426.
- Sands D.C., Pilgeram A.L., Zidack N.K., Jacobsen B.J., Tiourebaev K.S., 2003. Enhancing efficacy of bioherbicides. In : *Pseudomonas syringae and related pathogens: Biology and Genetic.* Kluwer Academic Publishers. 431-441.
- Schiltz S., Gaillard I., Pawlicki-Jullian N., Thiombiano B., Mesnard F., Gontier E., 2015. A review: what is the spermosphere and how can it be studied? *Journal of Applied Microbiology* **119**, 1467-1481.
- Siddiqui I., Bajwa R., Javaid A., 2010. Field evaluation of *Alternaria alternata* as mycoherbicide for the management of *Rumex dentatus* L.. *Philippine Agricultural Scientist* **93**, 116-120.
- Silvy C., 1995. Quantifions le phytosanitaire II. *Courrier de l'Environnement* **25**, 80-91
- Soltani N., Dille A.J., Burke I.C., Everman W.J., VanGessel M.J., Davis V.M., Sikkema P.H., 2016. Potential corn yield losses due to weeds in North America. *Weed Technology* **30**, 979-984.
- Stassart P.M., Baret P., Grégoire J.C., Hance T., Mormont M., Reheur D., Stilmant D., Vanloqueren G., Visser M., 2012. *L'agroécologie : trajectoire et potentiel pour une transition vers des systèmes alimentaires durables.* Groupement Interdisciplinaire de Recherche en Agroécologie FNRS, Belgique, www.agroecology.be.
- Stoller E.W., Wax L.M., 1973. Temperature variations in the surface layers of an agricultural soil. *Weed Research* **13**, 273-282.
- Stoate C., Baldi A., Beja P., Boatman N.D., Herzon I., van Doorn A., de Snoo G.R., Rakosy L., Ramwell C., 2009. Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe – A review. *Journal of Environmental Management* **91**, 22-46.
- Storkey J., 2005. Modelling assimilation rates of 14 temperate arable weed species as a function of the environment and leaf traits. *Weed Research* **45**, 361-370.
- Storkey J., 2006. A functional group approach to the management of UK arable weeds to support biological diversity. *Weed Research* **46**, 513-522.
- Swanton C.J., Nkoa R., Blackshaw R.E., 2015. Experimental methods for crop-weed competition studies. *Weed Science* **63**, 2-11.
- Swinton S.M., Buhler D.D., Forcella F., Gunsolus J. L., King R.P., 1994. Estimation of crop yield loss due to interference by multiple weed species. *Weed Science* **42**, 103-109.
- Talbot J.M., Martin F., Kohler A., Henrissat B., Peay K.G., 2015. Functional guild classification predicts the

- enzymatic role of fungi in litter and soil biogeochemistry. *Soil Biology and Biochemistry* **88**, 441-456.
- Tenenhaus M., Vinzi V.E., Chatelin Y.-M., Lauro C., 2005. PLS path modeling. *Computational Statistics & Data Analysis* **48**, 159-205.
- Thomann M., Imbert E., Engstrand R.C., Cheptou P.O., 2015. Contemporary evolution of plant reproductive strategies under global change is revealed by stored seeds. *Journal of Evolutionary Biology* **28**, 766-778.
- Thomas J.-M., Juncker E., 1995. Essais de désherbage non chimique de l'oignon repiqué de plein champ. In : XVI^{ème} Conférence COLUMA, Journées Internationales sur la Lutte contre les mauvaises herbes, ANPP, Reims, 395-402.
- Thomas B., Vince-Prue D., 1997. Photoperiodism in Plants, 2nd edition Academic Press, London, pp. 355–365 Appendix I.
- Thompson K., Band S.R., Hodgson J.G., 1993. Seed size and shape predict persistence in soil. *Functional Ecology* **7**, 236-241.
- Toljander J.F., Santos-González J.C., Tehler A., Finlay R.D., 2008. Community analysis of arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria in the maize mycorrhizosphere in a long-term fertilization trial. *FEMS Microbiology Ecology* **65**, 323-338.
- Trakhtenbrot A., Nathan R., Perry G., Richardson D.M., 2005. The importance of long-distance characterization of nine new microsatellite markers in *Taraxacum* (Asteraceae). *Molecular ecology notes* **4**, 645-648.
- Triplett G., Warren A., 2008. No-tillage crop production: a revolution in agriculture! *Agronomy Journal* **100**, 153-165.
- Trognitz F., Hackl E., Widhalm S., Sessitsch A., 2016. The role of plant-microbiome interactions in weed establishment and control. *FEMS Microbiology Ecology* **92**(10), 15 p. doi: 10.1093/femsec/fiw138.
- Trudgill D.L., Honek A., Li D., Van Staalén M.N., 2005. Thermal time - concepts and utility. *Annals of Applied Biology* **146**, 1-14.
- Turnbull L.A., Coomes D., Hector A., Rees M., 2004. Seed mass and the competition/colonization trade-off: competitive interactions and spatial patterns in a guild of annual plants. *Journal of Ecology* **92**, 97-109.
- UIPP, 2018. Repères d'activités 2017-2018. <http://www.uipp.org/flipbook/>. 20 p.
- Ullrich S.D., Buyer J.S., Cavigelli M.A., Seidel, R., Teasdale J. R., 2011. Weed seed persistence and microbial abundance in long-term organic and conventional cropping systems. *Weed science* **59**, 202-209
- Valantin-Morison M., Meynard J.-M., 2008. Diagnosis of limiting factors of organic oilseed rape yield. A survey of farmers' fields. *Agronomy for Sustainable Development* **28**, 527-539.
- Van Heemst H.D.J., 1985. The influence of weed competition on crop yield. *Agricultural Systems* **18**, 81-93.
- Varlet-Grancher C., Bonhomme R., 1982. Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. *Æcologica Plantarum* **3**, 3-26.
- Varlet-Grancher C., Gosse G., Chartier M., Sinoquet H., Bonhomme R., Allirant J.M., 1989. Mise au point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *agronomie* **9**, 419-439.
- Vioix J.-B., Douzals J.-P., Truchetet F., 2004. Development of a multispectral imagery device devoted to weed detection. *Journal of Electronic Imaging* **13**(3), 547-552.
- Vurro M., Andolfi A., Boari A., Zonno M.C., Caretto S., Avolio F., Evidente A., 2012. Optimization of the production of herbicidal -toxins by the fungus *Ascochyta caulina*. *Biological Control* **60**, 192-198.
- Wagner M., Mitschunas N., 2008. Fungal effects on seed bank persistence and potential applications in weed biocontrol: A review. *Basic Applied Ecology* **9**, 191-203.
- Wardle D.A., Bardgett R.D., Klironomos J.N., Setälä H., van der Putten W.H., Wall D.H., 2004. Ecological Linkages between Aboveground and Belowground Biota. *Science* **304**, 1629-1633.
- Washitani I., Nishiyama S., 1992. Effects of seed size and seedling emergence time on the fitness components of *Ambrosia trifida* and *A. artemisiifolia* var. *elatior* in competition with grass perennials. *Plant Species Biology* **7**, 11-19.
- Wezel A., Bellon S., Doré T., Francis C., Vallod D., David C. 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy of Sustainable Development* **29**, 503-515.
- Wiese A.M., Binning L.K., 1987. Calculating the threshold temperature of development for weeds. *Weed Science* **35**, 177-179

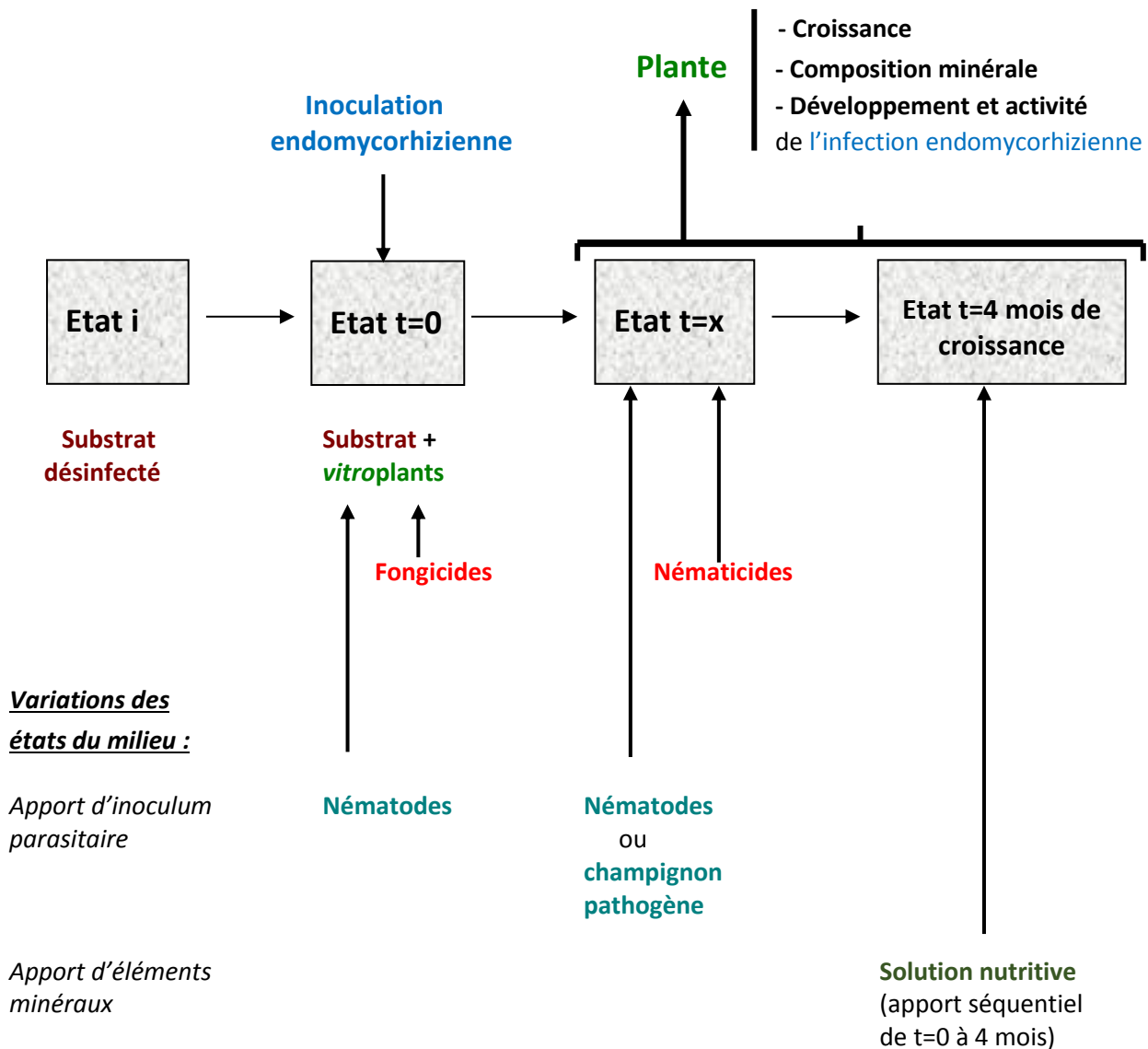
- Wilkerson G.G., Jones J.W., Coble H.D., Gunsolus J.L., 1990. SOYWEED – a simulation-model of soybean and common cocklebur growth and competition. *Agronomy Journal* **82**, 1003-1010.
- Willi Y., 2009. Evolution towards self-compatibility when mates are limited. *Journal of Evolutionary Biology* **22**, 1967-1973.
- Willsey T., Chatterton S., Carcamo H., 2017. Interactions of Root-Feeding Insects with Fungal and Oomycete Plant Pathogens. *Frontiers in Plant Science* **8**, 6 p. article 1764. doi: 10.3389/fpls.2017.01764.
- Wilson P.J., 1993. Conserving Britain's cornfield flowers. In: Proceedings of an international conference. Brighton crop protection conference, weeds. Tome 1, 411–416.
- Yenish J.P., Doll J.D., Buhler D.D., 1992. Effects of tillage on vertical-distribution and viability of weed seed in soil. *Weed Science* **40**, 429-433.
- Young A.G., Boyle T., Brown T., 1996. The population genetic consequences of habitat fragmentation for plants. *Trends in Ecology and Evolution* **11**, 413-418.
- Zhang WJ, Jiang FB, Ou JF, 2011. Global pesticide consumption and pollution: with China as a focus. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences* **1(2)**, 125-144.
- Zimdahl R. L., 2007. Weed-crop competition: a review. John Wiley & Sons. 220 p.
- Zimdahl R. L. 2013. Fundamentals of weed science. Academic Press. Boston, USA. 648
- Zwaenepoel P., Le Bars J.-M., 1997. L'agriculture de précision. *Ingénieries – EAT* **12**, 67-79.

Annexes

Annexe 1 :

Dispositif expérimental développé au cours des travaux de thèse

Représentation schématique des facteurs de variations pris en compte dans l'étude de l'acclimatation des *vitroplants* d'ananas :



Annexe 2 :

Expérimentation «analyse de la concurrence oignon/adventice»

Dispositif expérimental avec l'ensemble des modalités (dates de désherbage et présence ou non de la culture)

| Plantation fin mars - début avril | | Récolte fin août |
|---|--|--------------------------------------|
| Culture d'oignon sans adventice | | |
| Population naturelle d'adventices (aucun désherbage) | | |
| Culture d'oignon désherbée | pendant une durée inférieure à la (désherbage durant 6 ou 7 semaines) | <u>période critique</u> |
| Population naturelle d' | adventices à partir de la 6 ^e ou 7 ^e semaine | après la plantation |
| Culture d'oignon désherbée durant la <u>période critique</u> | | (c'est à dire pendant 8 semaines) |
| Population naturelle d' | adventices à partir de la 8 ^e semaine | après la plantation |

- Expérimentation à deux répétitions.
- Mesure de l'interception lumineuse pendant 24 heures pour chaque situation une fois toutes les semaines pour chaque répétition.
- Variables mesurées :
 - Prélèvement d'oignon : densité, nombre de feuille, surface foliaire, matière sèche.
 - Prélèvement d'adventice : densité, identification, matière sèche.

Annexe 3 :

Successions culturales et stratégies de gestion testées sur l'expérimentation «vulpin résistant»

Itinéraires techniques réalisés sur chacune des parcelles pour le contrôle de la population de vulpin résistant.

| Système de culture | Nom de la parcelle <i>Stratégie appliquée</i> | Première phase 1996-1999 | Première phase 1999-2002 |
|---------------------------------|--|---|--|
| RC Rotation classique | RC1 <i>Stratégie classique basée sur les pratiques locales</i> | Utilisation systématique d'herbicides. Travail superficiel (15 cm). Dates de semis précoces. Fertilisation optimale. | Id première phase mais désherbage réduit |
| | RC2 <i>Stratégie visant à minimiser le vulpin</i> | Labour systématique et dates de semis retardée (15 jours minimum). Désherbage en fonction de la présence de vulpins. | Id première phase mais désherbage réduit en fonction de la présence effective de vulpins et un seul labour sur la rotation |
| | RC3 <i>Stratégie bas intrants combinée à un contrôle du vulpin</i> | Travail du sol superficiel (15 cm). Date de semis retardé. Fertilisation réduite. Un seul traitement herbicide par année culturale. | |
| | RC4 <i>Ré-utilisation des herbicides de la famille de «Fops»</i> | - | Travail du sol superficiel (15 cm). Date de semis retardée. Fertilisation réduite. Un traitement par un "fop" par an. |
| NR Nouvelle rotation | NR1 <i>Stratégie classique basée sur les pratiques locales</i> | Utilisation intensive d'herbicides. Travail superficiel (15 cm). Dates de semis normales. Fertilisation optimale. | |
| | NR2 <i>Stratégie visant à minimiser le vulpin</i> | Labour systématique après la culture d'hiver et dates de semis retardée (15 jours minimum). Désherbage en fonction de la présence de vulpins. | |
| | NR3 <i>Stratégie bas intrants combinée à un contrôle du vulpin</i> | Travail du sol superficiel (15 cm). Date de semis retardé. Fertilisation réduite. Un seul traitement herbicide par année culturale. | |
| | NR4 <i>Ré-utilisation des herbicides de la famille de «Fops»</i> | Voir NR2 | Travail du sol superficiel (15 cm). Date de semis retardée. Fertilisation réduite. Un traitement par un "fop" par an. |