



HAL
open science

Caractériser l'inoculum pour prévoir les risques épidémiques en santé des plantes

Christel Leyronas

► **To cite this version:**

Christel Leyronas. Caractériser l'inoculum pour prévoir les risques épidémiques en santé des plantes. Sciences agricoles. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 2019. tel-02790123

HAL Id: tel-02790123

<https://hal.inrae.fr/tel-02790123>

Submitted on 14 Apr 2023

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 DE SYNTHÈSE PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DE
L'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES**

SPECIALITÉ SCIENCES AGRONOMIQUES

Christel LEYRONAS

Ingénieure de recherche INRA

Pathologie végétale, INRA Paca site d'Avignon, 84140 Montfavet

**CARACTÉRISER L'INOCULUM POUR
PRÉVOIR LES RISQUES ÉPIDÉMIQUES EN SANTÉ DES PLANTES**

12 JUIN 2019

Jury

Marie-Laure DESPREZ-LOUSTAU
Renaud IOOS
Pascal POUPARD
Charles GREIF
Claire NEEMA
Ivan SACHE

rapporteur
rapporteur
rapporteur
examineur
examineur
examineur

Remerciements

Il y a quelques années, j'avais commencé les remerciements de mon rapport de thèse par la devise de l'Ardèche : « Mountaren tan que pourren » (nous monterons tant que nous pourrons). Pour ce rapport d'HDR je réitère, parce qu'encore une fois je m'étonne d'être arrivée là et parce qu'encore une fois je constate qu'on ne réussit jamais seul, pour cela il faut être bien accompagné.

Ces remerciements sont pour moi l'occasion d'exprimer ma gratitude à tous les collègues qui m'ont accompagnée, conseillée, formée, encouragée, qui ont échangé, collaboré, construit, expérimenté, publié avec moi au cours de ces 21 années de carrière. Ils ont été nombreux et cette page ne suffirait pas à tous les citer. Je souhaite cependant mentionner ceux qui, par la confiance qu'ils m'ont témoignée, ont eu une influence significative sur mon évolution professionnelle jusqu'à présent : Pr. Guy Raynal, Dr. Cindy Morris, Dr. Philippe Nicot, Dr. Marc Bardin. Je remercie également chaleureusement tous les collègues de l'unité de Pathologie Végétale pour leur implication quotidienne, notamment les collègues de l'équipe Mistral, pour leur engagement et leur travail à mes côtés, ainsi que tous les non-permanents avec qui j'ai eu l'occasion de travailler. C'est une grande chance de faire partie d'une équipe et d'une unité où règnent une telle cohérence et une telle cohésion.

Je remercie les membres du jury d'avoir accepté de participer et pour le temps qu'ils ont consacré à ma démarche pour obtenir l'HDR. Merci au Dr. Odile Berge pour la relecture et les derniers ajustements du mémoire.

J'ai également une pensée pour tous les obstacles de la vie, de quelque nature que ce soit. C'est aussi grâce à tout ce qu'ils m'ont appris, dans tous les domaines, que j'en suis là.

Enfin, je suis infiniment reconnaissante à mes amis et à ma famille, toutes les racines et toutes les branches, pour leur bienveillance, leur attention et leur affection. Je remercie particulièrement mon frère qui veille toujours au grain ;-)

Je dédie ce mémoire à mes Parents.

SOMMAIRE

Curriculum vitae	1
Activités d'animation de la recherche, d'encadrement et responsabilités collectives	3
Liste des productions scientifiques	7
Résumé du parcours scientifique et contexte général des travaux de recherche	15
Frise temporelle du déroulé de carrière	20
Synthèse des activités de recherche : caractériser l'inoculum pour prévoir les risques épidémiques en santé des plantes	21
Identifier et caractériser les agents pathogènes	23
1-Agents responsables des maladies foliaires de la luzerne porte-graine	23
2-Etiologie de la fusariose de l'ail	25
3-Spécialisation d'hôte chez des champignons polyphages	26
3-1 Spécialisation d'hôte : cas de <i>B. cinerea</i>	27
3-2 Spécialisation d'hôte : cas de <i>S. sclerotiorum</i>	29
4- Espèces cryptiques	31
4-1 <i>S. sclerotiorum</i> et <i>S. subarctica</i>	31
4-2 <i>B. cinerea</i> et <i>B. pseudocinerea</i>	32
5- Conclusion et perspectives	33
5-1 Perspectives étiologie et épidémiologie de la fusariose de l'ail	33
5-1-1 Projet SYNERGIES (2019-2022)	33
5-1-2 Projet OCARINA (2019-2021)	34
5-2 Caractérisation génétique	35
Identifier les réservoirs d'inoculum	37
1-Inoculum dans les semences de graminées fourragères	37
1-1 Endophytes stricts du genre <i>Neotyphodium</i> dans les semences	38
1-2 <i>E. typhina</i> sur semences et plantes de dactyle	39
2- Inoculum dans les compartiments aérien et tellurique	40
2-1 Inoculum aérien vs inoculum tellurique: cas de <i>B. cinerea</i>	41
2-2 Inoculum tellurique vs inoculum aérien: cas de <i>S. sclerotiorum</i>	43
3-Inoculum dans les habitats non agricoles	45
4- Conclusion et perspectives	47
4-1 L'étude des champignons endophytes à l'heure actuelle	47
4-2 Méta-analyses génétiques pour identifier les potentielles sources d'inoculum	48
Evaluer la dissémination aérienne de l'échelle locale à l'échelle globale	50
1-Mesure des flux de microorganismes au-dessus d'un couvert végétal	51
2-Flux d'inoculum entre structures semi-fermées (tunnels de culture)	54
2-1 Modélisation physique des flux de spores	54
2-2 Données génétiques	56
3-Dissémination d'inoculum à grande échelle	57
3-1 Données quantitatives	58
3-2 Caractéristiques génétiques de l'inoculum aérien	59
3-3 Notion de connectivité aérienne	61
4- Conclusion et perspectives	64
4-1 Origine de l'inoculum	64
4-2 Connectivité aérienne	64
4-3 Projet Tropolink	65
4-4 Vers un outil d'aide à la décision	66

Manager un collectif humain	69
1-Communiquer	69
1-1 Cadre de référence	70
1-2 Les dangers de l'interprétation	70
1-3 L'assertivité	71
2-Valoriser et reconnaître les compétences	71
2-1 Les signes de reconnaissance	71
2-2 Organisation et évolution des compétences	72
2-3 Promotion	74
3-Conclusion et perspectives	75
3-1 Formations	75
3-2 Groupes de travail	75
3-3 Communication	76
3-4 Système de promotion	77
Conclusion générale	78
Références bibliographiques	80
Annexes : quelques publications significatives	83

CURRICULUM VITAE

Christel LEYRONAS

INRA - UR407 Pathologie Végétale

67 allée des chênes – CS 60094

84143 Montfavet cedex- France

Tel: 04 32 72 28 67 - Fax: 04 32 72 28 42

christel.leyronas@inra.fr

http://www6.paca.inra.fr/pathologie_vegetale/

Née le 13 juillet 1973 à Aubenas (07)

Nationalité française

DIPLOMES

2005 Doctorat de phytopathologie, Ecole doctorale ABIES, Paris-INRA Grignon

1997 Diplôme d'ingénieur Agronome de l'ENSAIA (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires) Nancy + FCE (First Certificate in English)

1991 Baccalauréat D, mention bien, Aubenas.

EXPERIENCES DE RECHERCHE

2018 Autorisation à diriger des recherches, délivrée par l'ED 536, UAPV

Depuis 2016 Directrice adjointe chargée des RH, Unité de Pathologie Végétale, INRA Avignon

2010 Obtention du grade d'ingénieure de recherche par réussite aux concours internes de promotion sur place INRA.

2005-2010 Ingénieure d'étude, Unité de Pathologie Végétale, INRA Avignon. Responsable de la thématique «Aérobiologie des organismes phytopathogènes des cultures maraichères »

1998-2005 Ingénieure d'étude, UMR Epidémiologie végétale et écologie des populations, INRA Grignon. Responsable du laboratoire de pathologie des plantes fourragères.

1997 Stage de fin d'études d'ingénieur, 7 mois, FNAMS (26) « Etude de la nuisibilité du complexe parasitaire de la luzerne porte-graine, intérêt d'une protection fongicide ».

1996 Stage 1 mois, Université d'Aberdeen (Ecosse) « Etude des défauts de germination chez les semences de tournesol »

FORMATIONS

Techniques

Biologie moléculaire (1999-9j)

PCR Quantitative (2008, 3j)

Statistiques classiques (2006, 3j)

Traitement statistique des petits échantillons (2006, 3j)

Analyse de variance et plans d'expérience (2006, 3j)

Scientifiques

Génétique des populations (2013, 3j)

Introduction à la biologie évolutive (2015, 2j)

Rédaction de publications pour chercheurs (2016, 1j)

Management

Membre de Jury Concours Externe ITA (2009, 2j)

Conduite de projets (2010-2011, 4j)

Management (2015-2016, 9j)

Ressources Humaines pour les DU, Inra Paris (2016, 2j)

Conduite d'entretiens annuels (2016, 2j)

Management de la prévention (2017, 1j)

Améliorer sa relation à soi et aux autres-Analyse transactionnelle (2017, 3j)

Président et membre de jury de concours internes (2018, 2j)

ACTIVITES D'ANIMATION DE LA RECHERCHE, D'ENCADREMENT ET RESPONSABILITES COLLECTIVES.

ACTIVITES D'ENCADREMENT

Doctorants

- Chrétien P., 2018-2021. Caractérisation des agents phytopathogènes responsables des pertes de la filière ail. Mise au point d'une méthode de détection. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, ED 536 (Bourse CIFRE ; co-direction de la thèse)
- Adjebli A., 2012. Caractérisation phénotypique et génotypique des souches de *Botrytis cinerea*, agent causal de la pourriture grise sur tomate. Université de Abderrahmane Mira, Bejaia, Algérie. (Encadrement et formation pour la partie génotypage et génétique des populations)
- Pintye A., 2012. *Ampelomyces* hyperparasites in powdery mildews: host-specialization, intracellular sporulation and biocontrol. Plant Protection Institute, Budapest, Hongrie. (Encadrement et formation pour la partie génotypage)

Stagiaires de master

- Ricard P. 2017. Les premiers pas vers l'étiologie et l'épidémiologie d'une maladie multifactorielle et en expansion : la fusariose de l'ail (*Allium sativum* L.). Diplôme d'ingénieur de l'Institut supérieur des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage, Angers. (Encadrement et formation pour la partie phénotypage)
- Bryone F. 2011. Caractérisation de populations de *B. cinerea* issues de cultures de laitues et de tomates sous abris. Diplôme d'ingénieur de l'Institut National d'Horticulture, Angers.
- Bordier M. 2010. Impact de pratiques culturales sur l'inoculum aérien et tellurique de *Botrytis cinerea* dans les tunnels maraîchers. Master 2 Gestion et qualité des productions végétales. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon.
- Pinault A. 2009. Etude de l'inoculum aérien de *Botrytis cinerea* et de *Sclerotinia sclerotiorum* sous tunnels horticoles. Master 1 Gestion et qualité des productions végétales. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon. (Co-encadrement P. Nicot, UR 407)
- Zeeshan K. 2006. Modeling fluxes of *Botrytis cinerea* airborne spores in tomato non-heated plastic tunnel. Master 2 Gestion et qualité des productions végétales. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon. (Co-encadrement P. Nicot, UR 407)
- Georget C. 1999. Etude du rôle des spores d'*Epichloe typhina* dans le développement de la quenouille du dactyle. Maitrise, Université de Corse Pascal Paoli

Stagiaires BAC+2 à BAC +3

- Borelly E. 2018. Isolement et caractérisation des souches fongiques responsables des pertes sur ail en conservation. BTS Biotechnologies au lycée Albert Camus, Nîmes.
- Blot A. 2016. Caractérisation phénotypique du champignon phytopathogène *Sclerotinia sclerotiorum*. IUT Génie Biologique, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon. (Co-encadrement P. Nicot, UR 407)
- Massonnat L. 2015. Caractérisation de la phase endophyte de *Botrytis cinerea* et *Sclerotinia sclerotiorum*. IUT Génie Biologique, Saint Etienne.
- Del Vitto A. 2012. Caractérisation de populations de *Botrytis cinerea* prélevées sur laitues et tomates. IUT Génie Biologique, Université Claude Bernard, Lyon. (Co-encadrement M. Bardin)
- Lovet L. 2011. Evaluer le lien statistique entre concentration de spores de *Botrytis cinerea* dans l'air, variables climatiques locales et mouvements des masses d'air. Licence Gestion et traitement statistique de bases de données, Université de la Méditerranée, Marseille. (Co-encadrement S. Soubeyrand, BioSp)
- Chapuis M. 2009. Mesure des flux de bactéries du couvert végétal vers l'atmosphère et caractérisation de leur support. IUT Génie Biologique, Université Claude Bernard, Lyon.
- Denuelle J. 2008. Caractérisation de populations aériennes de *Botrytis cinerea* et modélisation de flux de spores en tunnel. IUT Génie Biologique, Université Claude Bernard, Lyon.
- Vigier F. 2008. Mesure de flux et caractérisation de bactéries phytopathogènes glaçogènes dans l'atmosphère. DUT Génie Biologique, Université d'Auvergne, Clermont-Ferrand.
- Bronzi A. 2007. Flux de bactéries phytopathogènes dans l'atmosphère : conséquences sur la qualité des produits maraîchers. IUT Génie Biologique Université de Provence, Digne-les-Bains.
- Goulin G. 2007. Modélisation des flux de spores de *Botrytis cinerea* à l'intérieur d'abris de type tunnel. DUT Génie Biologique, Université d'Auvergne, Clermont-Ferrand.
- Afanniss A., 2006. L'atmosphère comme vecteur des micro-organismes phytopathogènes. IUT Génie Biologique, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon. (Co-encadrement C. Morris)
- Timmerman L., 2004. *Neotyphodium lolii*, champignon endophyte du ray-grass anglais : les méthodes d'élimination. BTS agronomie et productions végétales.
- Loubet C., 2003. Elimination du champignon endophyte chez le ray-grass et la fétuque élevée. BTSA Technologies Végétales.

ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT/FORMATION

- Depuis 2008 Agrosociences, Master 1 et 2 Gestion et Qualité des Productions Végétales Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse. Travaux pratiques de phytopathologie. Cours magistral sur l'aérobiologie des champignons phytopathogènes.
- Depuis 2017 IUT Génie Biologique 2^e année. Travaux pratiques de phytopathologie.
- Depuis 2014 Formatrice interne INRA
« Mycologie » et « Les bases de la pathologie végétale » pour des agents INRA, de technicien à chercheur.

PARTICIPATION A DES PROJETS SCIENTIFIQUES FINANCES

- SPE, 2019-2021, OCARINA : « Identification des agents pathogènes et de l'origine de l'inoculum engendrant la fusariose sur l'ail et la carotte semences ». **Co-porteuse du projet.**
- CASDAR SYNERGIES, 2019-2022 « Maîtriser les fusarioses dans les systèmes légumiers (melon et ail) selon la diversité des sols. Proposition de leviers agronomiques et écologiques en SYNERGIE avec les potentialités des contextes pédoclimatiques et des systèmes de culture conventionnels et biologiques ». Porteur du projet : ACTA
- AAP TERSYS 2018 « Caractérisation des *Fusarium* sp. engendrant des pertes sur ail rose en conservation » (ROCAIL). **Porteuse du projet.**
- H2020, 2014-2018 « Europe China lever for IPM demonstration » (EUCLID). Porteur du projet pour l'INRA : N. Desneux
- CASDAR, 2012-2017 « Protection intégrée des cultures légumières vis-à-vis de Sclerotinia : comprendre le pathogène et ses processus épidémiologiques clés pour combiner et maîtriser les modes de gestion économes en intrants phytosanitaires ». (SCLEROLEG) porteur du projet : F. Villeneuve, CTIFL
- AAP SMaCH, 2014-2015 « Comprendre et prédire les épidémies de pourriture grise dues à *Botrytis cinerea* : vers un système d'alerte des risques épidémiques ». (COPAIRNIC) **Animatrice du projet**
- SPE, 2013-2014 « Facteurs de diversification chez *Botrytis cinerea* : comment faire de la recombinaison sans sexe ? ». **Co-porteuse du projet.**
- EA, 2010-2012 « MICROFLUX: Développement d'une méthode de mesure des flux verticaux de micro-organismes à l'échelle de parcelles agricoles ». Porteur du projet : Y. Brunet UR1263 EPHYSE
- SPE, 2010-2012 « Group dispersal: Building a body of theory for group dispersal in plant epidemiology ». Porteur du projet : S. Soubeyrand, UR BioSp
- SPE, 2010, « Influence de paramètres micro- et méso-climatiques sur les populations aériennes de *B. cinerea* ». **Porteuse du projet.**
- ANR-STRA, 2009-2012, « Gestion intégrée des bioagresseurs telluriques en systèmes de culture légumiers » (SYSBIOTEL). Porteur du projet : P. Lucas, UMR Bio3P.

- SPE, 2009, « La Grande Evasion : les processus impliqués dans le transport de phytobactéries vers l'atmosphère ». **Porteuse du projet.**
- ANR-ADD, 2005-08, « Viabilité des systèmes de cultures protégées dans un contexte d'agriculture durable » (ECOSERRE). Porteur du projet T. Boulard (URIH Sophia Antipolis).
- CTPS, 2002-2004, « Mise au point et développement d'une méthode d'élimination de *Neotyphodium* spp. dans les semences de graminées ». Porteur du projet F. Deneufbourg (FNAMS)

MISSIONS D'EXPERTISE

- De 2014 à 2017 Membre élu du conseil d'administration de la Société Française de Phytopathologie.
- De 2003 à 2005 Membre de la section « Plantes fourragères et à gazon » du CTPS.
- Reviewer pour les revues : Journal of Environmental Monitoring, Journal of Aerosol Science, Aerobiologia, Atmospheric Environment, Atmospheric Research, The Analyst, Biomed Central, Plant Disease, FEMS Microbiology Ecology, Acta Botanica Gallica, Phytopatologia Mediterranea, Journal of Plant Pathology, Canadian Journal of Plant Pathology, Plant and Soil.
- 2015-...: Expert scientifique évaluation projets FranceAgriMer.

ACTIVITE DE VULGARISATION-TRANSFERT VERS LE PUBLIC

- Animation d'une table ronde « Rencontre chercheurs/scolaires » pour la fête de la science. Discussion avec 8 groupes de collégiens et lycéens sur les métiers de la recherche (octobre 2017).
- Participation à la journée Sclérotinia du CTIFL (Lanxade, 4 mai 2017). Présentation de 2 communications orales pour les 60 participants (agriculteurs, conseillers techniques, techniciens de coopératives...)
- Présentation orale pour la journée « rencontre enseignants chercheurs » organisée par le rectorat de l'académie Aix-Marseille, sur le thème de « la diversité des champignons microscopiques face à la diversité végétale » (mai 2017).
- Animation d'un atelier sur les champignons microscopiques pour les 70 ans de l'INRA (2016) et pour la journée des nouveaux arrivants du centre INRA Paca (2015, 2018).

PARTICIPATION A DES COMITES DE RECRUTEMENT ET JURY DE THESE

- Présidente de jury de concours interne de recrutement sur place (CIPP) pour le passage dans le corps des Assistants Ingénieurs, BAP ABCD (2018).
- Présidente de jury de concours externe INRA pour le recrutement de techniciens handicapés (2013)

- Membre de jury de concours externes INRA pour le recrutement de techniciens et d'ingénieurs (2008-2009-2010-2012-2018)
- Membre du comité de thèse de Myriam Bomble (2016-2019). Thèse CIFRE ISA Lille/Bayer Crop Science.

RESPONSABILITES COLLECTIVES

- Directrice adjointe, Unité de Pathologie Végétale, INRA Avignon (depuis 2016).
En charge des ressources humaines ITA (ingénieurs, techniciens, administratifs) : entretiens annuels d'activité, rédaction (avec le DU) des profils de postes demandés, entretiens des agents en mobilité entrante, gestion des conflits.
- Animatrice de la cellule concours de l'Unité de Pathologie Végétale (depuis 2014).
Aide et accompagnement des agents candidats aux concours internes et aux examens de Sélection Professionnelle.
- Animatrice du groupe de travail « stockage » de l'unité (2010-2013).
Réorganisation et optimisation des lieux de rangement de consommables de laboratoire.
- Membre du CSU de l'unité expérimentale du site St Paul (2007-2010).

PARTICIPATION A DES CONGRES

- International Congress on Aerobiology (Parme, Italie, 2018)
- Conference of the European Foundation for Plant Pathology (Dunkerque, 2017)
- Rencontres de Mycologie-Phytopathologie, JJC (Aussois, France, 2004, 2006, 2008, 2012, 2014, 2016)
- Colloque de la Société Française de Phytopathologie (Toulouse, 2005 ; Colmar, 2015)
- Colloque national « Microbiologie des Aérosols, MicrobAERO » (Narbonne, 2009 ; la Bourboule, 2013). **Membre du comité scientifique de l'édition 2009.**
- International conference on Applied Aspects of Aerobiology (Harpenden, UK, 2008)
- Journées de l'AFPP : génétique et prairies (Paris, France, 2005)
- Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes (Tours, France, 2003)
- Congrès de la Fédération Européenne des Herbages (La Rochelle, France, 2002). **Bénéficiaire d'une bourse de participation jeune chercheur.**
- Journées du Réseau Mycologie, Société Française de Mycologie (Toulouse, 2001 ; Nancy, France, 2003)
- Rencontres des microbiologistes de l'INRA (Dourdan, France, 1999)

LISTE DES PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES

Synthèse des publications

	Nombre de publications	IF
Aerobiologia	3	1.50
Annals of Applied Biology	1	2.04
Atmospheric Chemistry and Physics	1	5.31
Biogeosciences	1	3.44
Biosystems Engineering	1	2.13
Canadian Journal of Plant Pathology	1	0.89
Crop Science	1	1.62
Cryptogamie Mycologie	1	1.98
European Journal of Plant Pathology	1	1.47
Frontiers in Microbiology	1	4.01
Frontiers in Plant Science	1	3.67
Journal of Phytopathology	1	0.82
Journal of Plant Pathology	3	0.94
Plant Disease	2	3.17
Plant Pathology	2	2.30
Tropical Plant Pathology	1	0.78
Plos One	1	2.76
Mycology: An International Journal on Fungal Biology	1	nd

nd: IF non disponible

Publications dans des revues avec comité de lecture

- A1- Leyronas C., Benigni M., Leignez S., Duffaud M., Villeneuve F., Nicot P.C. 2019. Characterization of *Sclerotinia sclerotiorum* airborne inoculum, the widespread agent of white mould disease. *Aerobiologia*, doi: 10.1007/s10453-018-09555-x
- A2- Leyronas C., Morris C.E., Choufany M., Soubeyrand S. 2018. Assessing the aerial interconnectivity of distant reservoirs of *Sclerotinia sclerotiorum*. *Frontiers in Microbiology*, doi: 10.3389/fmicb.2018.02257
- A3- Leyronas C., Chrétien P.L., Troulet C., Duffaud M., Villeneuve F., Morris C.E., Hunyadi H. 2018. First report of *Fusarium proliferatum* causing garlic clove rot in France. *Plant Disease*, doi: 10.1094/PDIS-06-18-0962-PDN
- A4- Leyronas C., Bardin M., Berthier K., Duffaud M., Troulet C., Villeneuve F., Torres M., Nicot P. 2018. Assessing the phenotypic and genotypic diversity of *Sclerotinia sclerotiorum* in France. *European Journal of Plant Pathology* 152 : 933-944, doi: 10.1007/s10658-018-1493-9
- A5- Leyronas C., Troulet C., Duffaud M., Villeneuve F., Benigni M., Leignez S., Nicot P. 2018. First report of *Sclerotinia subarctica* in France detected with a rapid PCR-based test. *Canadian Journal of Plant Pathology*, doi:10.1080/07060661.2018.1438515
- A6- Bardin M., Leyronas C., Troulet C., Morris C.E. 2018. Striking similarities between *Botrytis cinerea* from non-agricultural and from agricultural habitats. *Frontiers in Plant Science*, doi: 10.3389/fpls.2018.01820
- A7- Nicot P., Avril F., Duffaud M., Leyronas C., Troulet C., Villeneuve F., Bardin M. 2018. Differential susceptibility to the mycoparasite *Paraphaeosphaeria minitans* among *Sclerotinia sclerotiorum* isolates. *Tropical Plant Pathology*, doi: 10.1007/s40858-018-0256-7
- A8- Carotenuto F. Georgiadis T., Gioli B., Leyronas C., Morris C.E., Nardino M., Wohlfahrt G. Miglietta F. 2017. Ecosystem-atmosphere exchange of microorganisms in a Mediterranean grassland: new insights into microbial flux through a combined experimental-modeling approach. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 1-30. doi : 10.5194/acp-2017-527
- A9- Leyronas C., Bryone F., Duffaud M., Nicot P. 2015. Assessing host specialization of *Botrytis cinerea* on lettuce and tomato by genotypic and phenotypic characterization. *Plant Pathology*, 64 : 119-127
- A10- Leyronas C., Duffaud M., Parès L., Jeannequin B., Nicot P. 2015. Flow of *Botrytis cinerea* inoculum between lettuce crop and soil. *Plant Pathology*, 64 : 701-708.
- A11- Leyronas C., Halkett F., Nicot P.C. 2015. Relationship between the genetic characteristics of *Botrytis* sp. airborne inoculum and meteorological parameters, seasons and the origin of air masses. *Aerobiologia*, 31 : 367-380.
- A12- Leyronas C., Bardin M., Duffaud M., Nicot P. C. 2015. Compared dynamics of grey mould incidence and genetic characteristics of *Botrytis cinerea* in neighbouring vegetable greenhouses. *Journal of Plant Pathology*, 97 : 439-447.

- A13- Pintye A., Ropars J., Nick Harvey N., Shin H-D., Leyronas C., Nicot P.C., Giraud T., Kiss L. 2015. Host phenology and geography as drivers of differentiation in generalist fungal mycoparasites. *PlosOne*, 10 , e0120703. doi : 10.1371/journal.pone.0120703
- A14- Adjebli A., Leyronas C., Aissat K., Nicot P.C. 2015. Comparison of *Botrytis cinerea* populations collected from tomato greenhouses in northern Algeria. *Journal of Phytopathology*, 163 : 124-132.
- A15- Leyronas C., Nicot P.C. 2013. Monitoring viable airborne inoculum of *Botrytis cinerea* in the South-East of France over 3 years: relation with climatic parameters and the origin of air masses. *Aerobiologia* 29 : 291-299.
- A16- Leyronas C., Duffaud M., Nicot P. 2012. Compared efficiency of the isolation methods for *Botrytis cinerea*. *Mycology: An International Journal on Fungal Biology*, 3 : 221-225.
- A17- Leyronas C., Fatnassi H., Bardin M., Boulard T., Nicot P.C. 2011. Modelling *Botrytis cinerea* spore exchanges and production in unheated greenhouses. *Journal of Plant Pathology* 93 : 407-414
- A18- Morris C.E., Sands D.C., Bardin M., Jaenicke R., Vogel B., Leyronas C., Ariya P.A., Psenner R. 2011. Microbiology and atmospheric processes: research challenges concerning the impact of airborne micro-organisms on the atmosphere and climate. *Biogeosciences*, 8 : 17-25
- A19- Fatnassi H., Leyronas C., Boulard T, Bardin M., Nicot P.C. 2009. Dependence of greenhouse tunnel ventilation on wind direction and crop height. *Biosystems Engineering*, 103 : 338-343
- A20- Leyronas C., Raynal G. 2008. Rôle of fungal ascospores in the infection of orchardgrass (*Dactylis glomerata*) by *Epichloe typhina* agent of choke disease. *Journal of Plant Pathology*, 90 : 15-21.
- A21- Leyronas C., Raynal G. 2008. Nouvelles observations sur les spores d'*Epichloe typhina* (Fr. ex Tul.), Clavicipitacée pathogène des graminées. *Cryptogamie Mycologie*, 29 : 11-17.
- A22- Leyronas C., Mériaux B., Raynal G. 2006. Chemical control of *Neotyphodium* spp. endophytes in perennial ryegrass and tall fescue seeds. *Crop Science*, 46: 98-104.
- A23- Leyronas C., Broucqsault L.M., Raynal G. 2004. Common and newly identified foliar diseases of seed-producing lucerne in France. *Plant Disease*, 88 : 1213-1218.
- A24- Leyronas C., Raynal G. 2002. Presence of *Neotyphodium*-like endophytes in European grasses. *Annals of Applied Biology*, 139: 119-127.

Publications dans des revues sans comité de lecture et publications destinés à des utilisateurs de la recherche

- A25- Nicot P.C., Avril F., Duffaud M., Leyronas C., Troulet C., Villeneuve F., Bardin M. 2016. Are there regional differences in the susceptibility of *Sclerotinia sclerotiorum* strains to *Coniothyrium minitans*? *IOBC WPRS Bulletin*, 117: 83-87
- A26- Leyronas C., Fatnassi H., Bardin M., Nicot P. 2008. Balance of airborne spores of *Botrytis cinerea* in tomato and lettuce tunnels and modelling of spore production. *Aspects of Applied Biology*, 89 : 43-48

- A27- Leyronas C., Marloie O., Morris C.E. 2008. Measurement of bacterial flux over a wheat crop and characterization of particles transporting bacteria. *Aspects of Applied Biology*, 89 : 31-36
- A28- Fatnassi H., Boulard T., Leyronas C., Bardin M., Nicot P.C. 2008. Greenhouse tunnel ventilation dependence on tomato crop height and leaf area index. *Acta Horticulturae* (ISHS) 801:1285-1292
- A29- Leyronas C., Raynal G. 2006. La quenouille du dactyle. Avancée des connaissances et conséquences pour la lutte. *Phytoma la Défense des Végétaux*, 593 : 52-54.
- A30- Leyronas C., Raynal G. 2003. Maladies observées en France sur graminées et légumineuses fourragères pérennes. *Phytoma la Défense des Végétaux*, 557 : 14-16.
- A31- Broucqsault L.M., Leyronas C., Raynal G. 1998. Maladies fongiques : Faut-il protéger les luzernes ? *Bulletin de la Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateurs de Semences* 143 : 18-20.

Chapitre d'ouvrages

- A32- Morris C.E., Leyronas C., Nicot P.C. 2014. Movement of Bioaerosols in the Atmosphere and the Consequences for Climate and Microbial Evolution (Chapter 16), p. 393-416. In I. Colbeck and M. Lazaridis (ed.), *Aerosol Science: Technology and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd.

Rapports diplômants

- B1- Leyronas C. 2005. Avancées dans la compréhension des *Neotyphodium* et *Epichloe*, clavicipitacées endophytes des graminées fourragères et à gazon. Méthodes de lutte. Thèse de docteur en phytopathologie. Ecole doctorale ABIES/UMR Epidémiologie végétale et écologie des populations Grignon. 168p
- B2- Leyronas C. 1997. Etude de l'incidence d'un complexe parasitaire sur luzerne porte-graine et intérêt d'une protection fongicide. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'agronomie appliquée ENSAIA, Nancy. 40p

Communications orales dans un congrès national ou international

- C1- Leyronas C., Choufany M., Martin O., Morris C.E., Nicot P.C., Soubeyrand S. 2018. Snooping into the invisible trajectory of airborne fungal inoculum. 11th International Congress on Aerobiology (3-7/09 Parma, Italy)
- C2- Leyronas C., Duffaud M., Troulet C., Villeneuve F., Bardin M., Nicot P.C. 2017. Assessing the phenotypic and genotypic diversity of *Sclerotinia sclerotiorum* in France. 10^e Conférence de la Société française de phytopathologie/12th European Foundation for Plant Pathology conference, (29/05-02/06/2017) Malo-les-Bains (FRA).
- C3- Leyronas C., M. Bardin, M. Duffaud, P. Nicot, C. Troulet, F. Villeneuve. 2016. Sclérolég un projet à l'interface entre le labo et le terrain. 11^{ème} rencontres de Phytopathologie-Mycologie, (25-29/01/2015) Aussois (FRA).
- C4- Nicot P.C., Avril F., Duffaud M., Leyronas C., Troulet C., Villeneuve F., Bardin M. 2016. Are there regional differences in the susceptibility of *Sclerotinia sclerotiorum* strains to

Coniothyrium minitans? 13th IOBC-WPRS Meeting of the working group "Biological control of fungal and bacterial plant pathogens, (12-15/09/2016), Berlin (DEU).

- C5- Leyronas C., Nicot P.C., Halkett F., Martin O., Soubeyrand S. 2015. Caractérisation de l'inoculum aérien de *Botrytis cinerea* pour la prévision des épidémies de pourriture grise. 9e colloque de la SFP, (2-5 /06/2015), Colmar (FRA).
- C6- Leyronas C. 2014. Epidémiologie et dispersion aérienne de champignons phytopathogènes. Journée PHI « Fonctionnement de la plante », (2/10/2014), Avignon (FRA)
- C7- Leyronas C., Soubeyrand S., Martin O., Nicot P.C., Dufils A., Tchamitchian M. 2014. Projet COPAIRNIC. Séminaire SMaCH (17-18/12/2014), Paris (FRA).
- C8- Leyronas C., Soubeyrand S., Martin O., Nicot P.C. 2013. Relations entre inoculum aérien de *Botrytis cinerea* et paramètres micro- et méso-climatiques. MicrobAERO 2013 (07-09/10/2013), La Bourboule (FRA).
- C9- Leyronas C., Soubeyrand S., Martin O., Halkett F., Nicot P.C. 2013. Origine de l'inoculum aérien de *Botrytis cinerea* : sources locales vs introduction à partir de sources éloignées ? Journée sur la biologie des populations introduites (07/11/2013) Sophia-Antipolis (FRA).
- C10- Brunet Y., Bonnefond J.-M., Garrigou D., Delmas F., Leyronas C., Morris C.E. 2013. A relaxed-eddy accumulation system for measuring microbial emission fluxes from the vegetation. 32th AAAR Annual conference, (30/09-04/10/2013), Portland (USA).
- C11- Leyronas C., Duffaud M., Nicot P.C. 2012. Evolution de l'abondance et des caractéristiques génétiques de l'inoculum aérien de *B. cinerea* pendant 3 ans. 9^{ème} Journées Jean Chevaugéon, (16-20 /01/2012), Aussois (FRA).
- C12- Leyronas C., Morris C.E. 2010. Flux d'agents phytopathogènes entre habitats agricoles et non agricoles: implications pour l'épidémiologie et l'évolution. 1^{ère} journées scientifiques INRA PACA, "La santé des Plantes à l'horizon 2030" (27-28/04/2010), Cogolin (FRA).
- C13- Leyronas C. 2011. La grande Evasion : processus impliqués dans la dissémination de bactéries phytopathogènes. 3^{ème} rencontres de porteurs de projet SPE, (19-20/10/2011), Ecully (FRA).
- C14- Leyronas C., Marloie O., Morris C.E. 2008. Measurement of bacterial flux over a wheat crop and characterization of particles transporting bacteria. International conference on Applied Aspects of Aerobiology, (19/11/2008), Harpenden (GBR).
- C15- Leyronas C., Fatnassi H., Bardin M., Nicot P.C. 2008. Balance of airborne spores of *Botrytis cinerea* in tomato and lettuce tunnels and modelling of spore production. International conference on Applied Aspects of Aerobiology, (19/11/2008), Harpenden (GBR).
- C16- Leyronas C. 2004. Sur la piste du mode de pénétration d'*Epichloe typhina* dans le dactyle. 5^e Rencontres de Phytopathologie/Mycologie, (18-22/01/2004), Aussois (FRA).

Communications par poster

- C17- Leyronas C., Martin O., Nicot P.C., Soubeyrand S. 2017. Predicting abundance of *Botrytis cinerea* airborne inoculum to forecast grey mould epidemics. 10^e Conférence de la Société française de phytopathologie/ 12th European Foundation for Plant Pathology conference, (29/05-02/06/2017), Malo-les-Bains (FRA).
- C18- Leyronas C., Bardin M., Duffaud M., Troulet C., Nicot P.C. 2015. Caractérisation des populations de *Sclerotinia sclerotiorum* en France. 9^e colloque de la SFP (2-5/06/2015), Colmar (FRA).
- C19- Leyronas C., Duffaud M., Bardin M. 2014. Facteurs de diversification chez *Botrytis cinerea* : comment faire de la recombinaison sans sexe ? 10^{ème} rencontres de Phytopathologie-Mycologie (27-31/01/2014), Aussois (FRA).
- C20- Leyronas C., Bryone F., Duffaud M., Nicot P.C. 2012. Evaluation de la spécificité d'hôte de *Botrytis cinerea* sur tomates et laitues par caractérisation génotypique et phénotypique. 9^{ème} Journées Jean Chevaugéon (16-20/01/2012), Aussois (FRA).
- C21- Bardin M., Monteil C., Leyronas C., Troulet C., Duffaud M., Morris C.E. 2012. Sources potentielles d'inoculum de *Botrytis cinerea* en dehors du contexte agricole sensu stricto. 9^{ème} Journées Jean Chevaugéon, (16-20/01/2012), Aussois (FRA).
- C22- Leyronas C., Halkett F., Duffaud M., Nicot P.C. 2012. Évolution des populations aériennes de *Botrytis cinerea* : un exemple d'aéromicrobiologie. Journées des Microbiologistes de l'INRA 2012, (13-15/11/2012), L'Isle-sur-la-Sorgue (FRA).
- C23- Leyronas C., Nicot P.C., Halkett F. 2012. Evolution temporelle des caractéristiques génétiques de l'inoculum aérien de *Botrytis cinerea* un champignon pathogène extrêmement polyphage. 34^e Réunion annuelle du Groupe d'Etude de Biologie et Génétique des Populations (Petit Pois Déridé 2012), (28-31/08/2012), Avignon (FRA).
- C24- Leyronas C. 2011. La grande évasion : processus impliqués dans le transport de phytobactéries vers l'atmosphère. 3^e Rencontres des Porteurs de Projets SPE 2011, (19-21/10/2011), Ecully (FRA).
- C25- Leyronas C., Duffaud M., Montarry J., Nicot P.C. 2010. Evolution of abundance and genetic structure of *Botrytis cinerea* airborne inoculum in the South East of France over 2.5 years, pp. XV International *Botrytis* Symposium, (30/05-04/06/2010), Cadiz (ESP).
- C26- Leyronas C., Duffaud M., Montarry J., Nicot P.C. 2010. Evolution of abundance and genetic structure of *Botrytis cinerea* airborne inoculum in the south east of France over 2.5 years. 15th International *Botrytis* Symposium, (30/05-04/06/2010), Cadiz (ESP).
- C27- Leyronas C., Marloie O., Morris C.E. 2008. Mesure de flux bactériens au-dessus d'un couvert végétal. 8^e Rencontres Plantes-Bactéries, (14-18/01/2008), Aussois (FRA).
- C28- Leyronas C., Fatnassi H., Bardin M., Nicot P.C. 2008. Modélisation de flux de spores de *Botrytis cinerea* en tunnels de tomate et laitue. 7^e Rencontres de Phytopathologie/Mycologie, (20-24/01/2008), Aussois (FRA).
- C29- Leyronas C. 2004. Sur la piste du mode de pénétration d'*Epichloe typhina* dans le dactyle. 5^e Rencontres de Phytopathologie/Mycologie, (28-22/01/2004), Aussois (FRA).

- C30- Mériaux B., Leyronas C. 2003. Efficacité de traitements de semences et d'une thermothérapie contre le *Neotyphodium* du ray-grass. 7^e Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, (03-05/12/2003), Tours (FRA).
- C31- Leyronas C., Neema C., Raynal G. 2003. Mise au point d'une technique de détection biomoléculaire d'*Epichloe typhina*, champignon responsable de la quenouille du dactyle. 7^e Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, (03-05/12/2003), Tours (FRA).
- C32- Leyronas C., Raynal G. 2003. Les différents types de spores chez *Epichloe typhina* et leurs rôles respectifs. Journées du Réseau Mycologie, (15-17/01/2003) Nancy (FRA).
- C33- Mériaux B., Leyronas C., Deneufbourg F. 2002. Effect of fungicides and heat treatment on seed germination of endophyte infected perennial ryegrass. 19^e Congrès de la Fédération Européenne des Herbages, (27-30/05/2002), La Rochelle (FRA).
- C34- Leyronas C., Raynal G. 2002. Artificial contamination of orchardgrass by *Epichloe typhina*, the agent of choke disease. 19^e Congrès de la Fédération Européenne des Herbages, (27-30/05/2002), La Rochelle (FRA).

RESUME DU PARCOURS SCIENTIFIQUE ET CONTEXTE GENERAL DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Après mes études d'ingénieur agronome, et un stage de fin d'études à la Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateurs de Semences (FNAMS) portant sur un complexe parasitaire de maladies foliaires de la luzerne porte-graine, j'ai choisi d'intégrer une équipe de recherche en pathologie végétale. J'ai été recrutée en 1998 sur un poste d'ingénieure d'étude du département INRA-SPE « Santé des Plantes et Environnement » dans l'UMR Epidémiologie Végétale et Ecologie des Populations à Grignon. Dans cette unité, j'ai rejoint l'équipe « pathologie des plantes fourragères » sous la responsabilité scientifique du Pr Guy Raynal (AgroParisTech, ex INA Paris-Grignon). J'occupais alors la fonction d'ingénieure pathologiste spécialisée sur les maladies fongiques aériennes des plantes fourragères et à gazon, entraînant des pertes économiques importantes dans des filières variées (semence, élevage, espaces-verts etc...). Mes missions étaient très larges allant de la conduite de recherches fondamentales sur ce thème, à l'accompagnement de la Profession (diagnostics, conseil, expertise) en passant par la gestion complète du laboratoire. Cette expérience a été formatrice car 1)- j'ai enrichi mes connaissances en bénéficiant de la grande expérience en phytopathologie du Pr Raynal, 2)- j'ai développé des compétences en conception de dispositifs expérimentaux pour répondre à des questions de recherche, 3)- j'ai appris à encadrer et former des étudiants, et enfin 4)- j'ai développé de très bonnes relations avec la Profession.

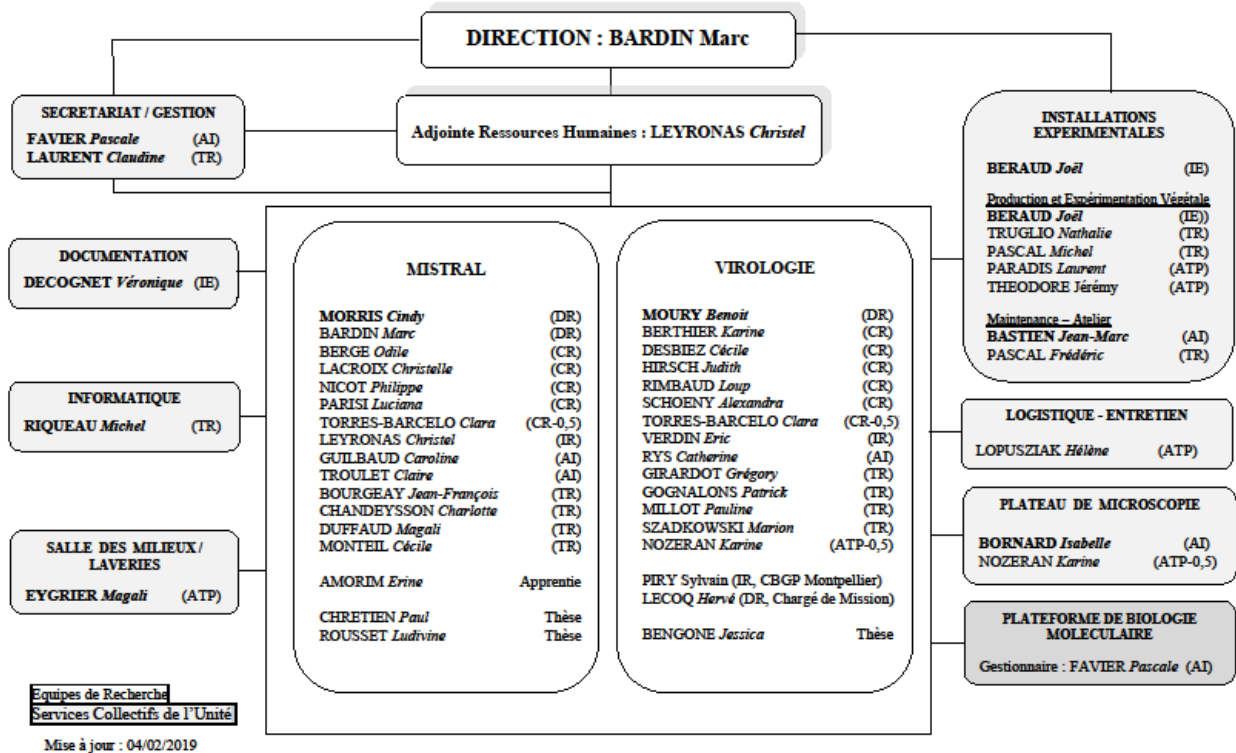
Faisant suite à mon stage de fin études, un volet de mes recherches concernait les maladies foliaires de la luzerne pour lesquelles tous les agents du complexe parasitaire n'étaient pas connus. Dans le cadre d'une collaboration avec la FNAMS j'ai assuré les diagnostics détaillés des échantillons et l'expertise scientifique lors d'une enquête exhaustive que nous avons réalisée sur les maladies du feuillage de la luzerne dans les trois bassins de production français. L'enquête a révélé que certaines maladies considérées comme mineures en France pouvaient en fait être très présentes dans certaines régions et devaient donc être prise en compte dans les pratiques phytosanitaires. Ce travail a permis de mettre en place des préconisations raisonnées de traitement chimique contre ces maladies foliaires.

A cette période j'ai également focalisé mes travaux de recherche sur la thématique des champignons endophytes appartenant aux genres *Neotyphodium/Epichloe*. J'ai étudié la biologie et le mode de transmission des *Epichloe* spp. pathogènes responsables des pertes économiques

sur graminées porte-graine, dans le but de mettre au point une méthode de lutte. J'ai également travaillé sur les *Neotyphodium* endophytes stricts (taxonomiquement très proches des *Epichloe spp.*) pouvant générer des toxicoses chez les animaux consommant des fourrages endophytés. J'ai abouti lors de cette recherche, à la mise au point d'une méthode d'éradication dans les semences par traitement chimique et par thérapie. J'ai alors entrepris de structurer mon travail de recherche et de présenter une thèse que j'ai soutenue le 26 mai 2005 (école doctorale ABIES, INA PG). La thèse représente une expérience pendant laquelle j'ai développé des compétences en formulation d'hypothèses scientifiques ainsi qu'en matière de rédaction d'articles.

En 2005, suite à un changement de stratégie scientifique à l'INRA, les plantes fourragères sont sorties des axes prioritaires de l'institut, et j'ai fait le choix d'une mutation thématique et géographique en rejoignant l'unité de Pathologie Végétale d'Avignon du centre de recherche INRA-PACA (<http://www.paca.inra.fr/>). Cette unité est rattachée au département SPE de l'INRA (<http://www.spe.inra.fr/>). Elle regroupe actuellement 41 agents titulaires répartis en deux équipes de recherche (Virologie et MISTRAL) et en services collectifs (Cf organigramme).

ORGANIGRAMME DU PERSONNEL DE L'UNITE 407 PATHOLOGIE VEGETALE



Les projets de recherche visent principalement à la création de connaissances et d'outils nécessaires pour la mise au point de méthodes et de stratégies de protection des cultures respectueuses de l'environnement contre les maladies virales, bactériennes et fongiques des cultures maraîchères essentiellement, et d'en estimer leur durabilité (http://www6.paca.inra.fr/pathologie_vegetale/).

A mon arrivée dans l'unité, j'ai intégré les deux équipes de mycologie et bactériologie, qui depuis ont fusionné (en 2012) pour créer l'équipe MISTRAL (MICrobiology of agroeco-Systems : TRAnslational research from pathogen Life histories). L'objectif central de cette équipe est d'approfondir les connaissances de l'écologie des microorganismes phytopathogènes à dissémination aérienne et aquatique, et de l'épidémiologie des maladies qu'ils provoquent sur les cultures maraîchères et fruitières, en vue de concevoir des dispositifs innovants de protection durable. Les modèles d'étude sont des agents phytopathogènes à fort impact économique, à large spectre d'hôte et ayant des capacités de dissémination aérienne et aquatique sur de longues distances, *B. cinerea*, *S. sclerotiorum* et *Pseudomonas syringae*.

Je suis depuis 2005, responsable de l'étude de l'impact de l'inoculum aérien d'agents phytopathogènes à large spectre d'hôte sur la gestion des risques phytosanitaires. J'ai réussi en 2010 un concours interne de promotion sur place, d'ingénieure de recherche. Ce changement de corps constituait une reconnaissance de mes compétences et m'a donné une légitimité pour le montage et la coordination de projets scientifiques. Mon travail porte sur la recherche et la caractérisation de l'inoculum aérien déclenchant les épidémies dans les abris contenant des cultures maraîchères ainsi que sur les cultures de plein champ. J'étudie également les flux d'inoculum entre les compartiments air/plante/sol. Mes objets d'étude jusqu'à maintenant sont *Botrytis cinerea* et *Sclerotinia sclerotiorum* qui engendrent d'importantes pertes économiques de par le monde sur cultures et en post-récolte. L'objectif de ces travaux est l'optimisation de la protection raisonnée des cultures. Pour cela, je conçois des dispositifs expérimentaux permettant de développer des stratégies d'échantillonnage et des méthodologies pour la quantification de l'inoculum aérien et sa caractérisation phénotypique et génotypique. La grande majorité des articles publiés portant sur l'inoculum aérien de champignons sont basés sur des données de quantification. Les articles portant sur la caractérisation de cet inoculum (notamment sur la diversité intra-espèce) sont extrêmement rares. Les articles issus de mon travail font partis de ceux-ci. Au-delà des champignons modèles travaillés dans notre équipe, ces dispositifs expérimentaux revêtent un aspect générique et peuvent être transposés à d'autres agents pathogènes à dissémination aérienne (champignons, bactéries, ayant un impact sur la santé

humaine, animale, végétale). Je contribue à la réflexion, la rédaction et la mise en œuvre de projets de recherche ainsi qu'à la valorisation des résultats.

L'occasion de transposer mes compétences à un nouveau pathosystème s'est présentée en 2017 lorsque j'ai été sollicitée par la filière de l'ail semences et de consommation pour trouver des solutions face à la fusariose émergente sur ail. Nous avons convenu ensemble du montage d'un dossier de bourse CIFRE. Je me suis chargée de la rédaction du projet scientifique de thèse et j'ai recruté le doctorant. Ainsi, depuis début 2018 je suis co-directrice d'une thèse CIFRE (obtention d'une ADR dans l'ED 536) portant sur la caractérisation des agents phytopathogènes responsables des pertes de la filière ail et sur la mise au point d'une méthode de détection. Je suis accompagnée dans cette première expérience d'encadrement de thèse par C. Morris (DR) qui en est co-directrice. En complément de la thèse et de son volet étiologie, j'ai développé des projets de recherche portant sur l'épidémiologie de la fusariose de l'ail et obtenu 3 financements sur ce thème (fédération TERSYS, CASDAR, SPE).

Au quotidien je travaille en étroite collaboration avec Philippe Nicot, Marc Bardin, tous deux chercheurs dans le laboratoire de mycologie, ainsi qu'avec Cindy Morris, animatrice de l'équipe MISTRAL. Mes travaux bénéficient de l'aide technique des différents agents permanents ou non titulaires (étudiants notamment) travaillant dans cette équipe. Ils sont basés sur des questions de recherche cognitive, ancrées dans des préoccupations de terrain. Ainsi, en plus d'avoir des échanges très enrichissants avec des collègues de filières professionnelles, je génère des connaissances pour répondre à des questions scientifiques concernant la gestion des risques épidémiques dans les cultures maraichères, et je participe également à la mise au point d'outils utilisables en pratique par la Profession. Dans ce cadre j'ai été amenée à développer des collaborations nationales et internationales.

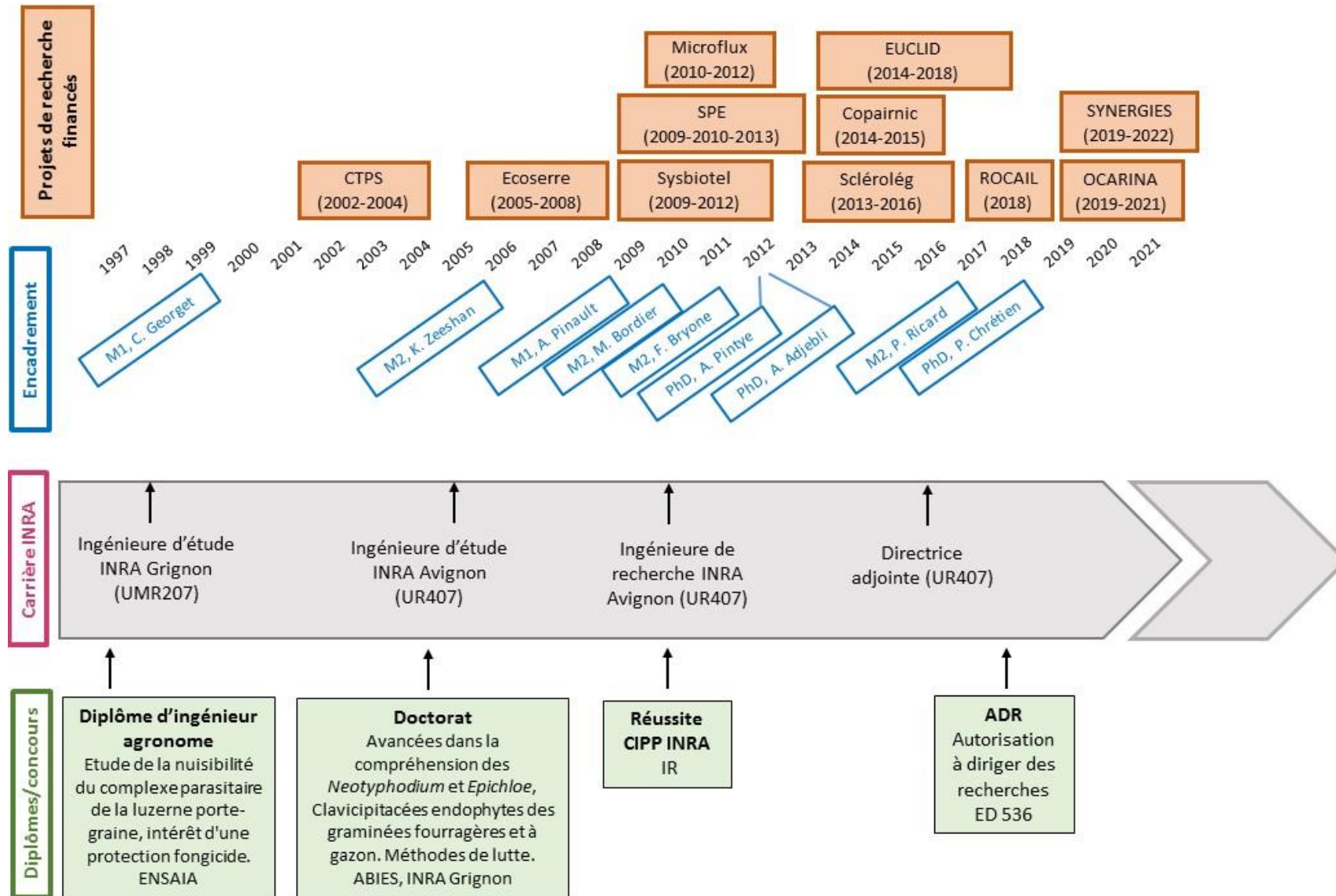
Enfin, au cours de ma carrière j'ai acquis une solide expérience en management, d'abord par l'encadrement de personnels techniques, de stagiaires et d'un doctorant, la création et l'animation de la cellule concours de l'unité, puis à travers mon mandat de directrice adjointe d'unité (en charge des ressources humaines depuis début 2016) et les formations spécifiques que j'ai suivies dans ce domaine. Les activités liées à ma mission de DUA occupent actuellement 40% de mon temps.

Mes motivations pour l'obtention d'une HDR sont avant tout, le souhait d'acquérir l'autonomie pour l'encadrement de doctorants dans le domaine de la pathologie végétale dans lequel je développe mes recherches depuis le début de ma carrière. J'apprécie le travail d'équipe ainsi que la formation de jeunes étudiants. J'aime leur transmettre des savoirs et savoir-faire et leur

permettre d'acquérir de l'autonomie pour poursuivre des études supérieures ou entrer dans la vie active à l'issue de leur formation. J'estime que la santé des plantes représente un enjeu très important pour l'avenir de l'agriculture (plans Ecophyto 1 et 2) et doit s'étoffer de nouvelles compétences et de nouveaux talents. Je participe à l'enrichissement et au renouvellement de ce vivier en formant des étudiants à différents niveaux de leur formation en BTS ou IUT en master 1 et 2 et maintenant en doctorat qui pourront investir leurs connaissances dans des carrières de la recherche, et/ou du développement dans ce domaine.

Cette étape sera pour moi une reconnaissance de mes compétences en matière de direction de travaux de recherche et d'encadrement d'étudiants et me permettra d'acquérir une plus grande autonomie de recherche. Ma motivation est aussi de participer au dynamisme global de mon unité de rattachement et à celui du Pôle de Recherche avignonnais en augmentant le nombre de scientifiques susceptibles d'encadrer des doctorants et d'amplifier l'impact de ma recherche en développant des axes nouveaux et des techniques innovantes avec des jeunes chercheurs en formation.

FRISE TEMPORELLE DU DEROULE DE CARRIERE



SYNTHESE DES ACTIVITES DE RECHERCHE :
CARACTERISER L'INOCULUM POUR PREVOIR LES RISQUES EPIDEMIQUES
EN SANTE DES PLANTES

On estime qu'il existe un million et demi d'espèces de champignons (*sensu lato*) sur terre dont dix mille sont responsables de maladies sur les végétaux, contre une cinquantaine responsables de maladies chez les humains et chez les animaux. Les maladies fongiques représentent 70 % des maladies des plantes cultivées. Les champignons phytopathogènes provoquent des symptômes très variés sur les plantes (tâches, flétrissements, pourritures molles et sèches, galles, cloques, pustules, chancres etc...) et engendrent chaque années des milliards d'euros de perte à l'échelle mondiale. Les méthodes de protection des plantes contre ces maladies, essentiellement basées sur l'utilisation de produits phytosanitaires, ont également un coût financier, environnemental et sanitaire. Ainsi ont été lancés les plans Ecophyto avec pour objectif de diminuer le recours aux produits phytosanitaires, tout en continuant à assurer un niveau de production élevé tant en quantité qu'en qualité.

Durant mes 21 années de carrière à l'INRA, l'objectif global de mon travail a été de faire progresser les connaissances pour mettre au point des méthodes de lutte contre les maladies fongiques des cultures (plantes fourragères dans un premier temps à Grignon, puis plantes maraichères dans un second temps à Avignon) efficaces, durables et respectueuses de l'environnement.

J'ai l'habitude de dire aux étudiants que j'encadre, mais aussi aux collègues de la Profession lorsque nous discutons de maladies des plantes et des méthodes de protection, que pour combattre efficacement et durablement son ennemi, il faut très bien le connaître : connaître son identité, connaître sa diversité (génétique, phénotypique), connaître les zones dans lesquelles il est localisé (sol, air, plante) et comprendre comment il se dissémine. De plus, il est très utile de rester ouvert au champ des possibles : aller au-delà des caractéristiques majeures connues (ou décrites) d'un microorganisme pour expliquer l'épidémiologie d'une maladie, car elles peuvent en cacher d'autres (un champignon tellurique peut se révéler très présent dans le compartiment aérien par exemple, ou vice-versa), ne pas se cantonner à étudier ce qu'il se passe sur une parcelle pour régler les problèmes de ladite parcelle, éviter de penser que ce qui est pathogène à un moment donné dans le cycle de vie d'une plante reste strictement et constamment pathogène. C'est ce que j'ai souhaité illustrer dans la synthèse qui suit.

Cette synthèse est donc structurée en 3 parties thématiques dans lesquelles figurent les principaux résultats, conclusions et perspectives de mes travaux de recherche depuis le début de ma carrière :

- identifier et caractériser les agents pathogènes,
- identifier les réservoirs d'inoculum,
- évaluer la dissémination aérienne de l'échelle locale à l'échelle globale.

Pour terminer cette synthèse une partie sera consacrée au management de collectif humain. Dans ce domaine aussi il faut savoir rester ouvert, aller au-delà des aprioris, tâcher de comprendre les individus pour optimiser le fonctionnement du collectif et le rendre efficace et durable.

En pratique, dans le texte, les références bibliographiques dont je suis co-auteur sont indiquées par la lettre et le numéro mentionnés dans la partie CV (ex : A1). Les autres articles sont indiqués classiquement et la liste de ces articles figure à la fin du document.

Quelques références d'articles significatifs dont je suis auteur sont inclus en fin de rapport.

IDENTIFIER ET CARACTERISER LES AGENTS PATHOGENES

Bien connaître l'agent pathogène responsable d'une maladie est une première étape indispensable pour espérer mettre au point une méthode de lutte efficace et durable contre cette maladie. Cette connaissance passe d'abord par l'identification des espèces responsables des symptômes (sur la base de critères morphologiques ou d'une identification moléculaire) et peut aller jusqu'à une caractérisation fine des individus à l'intérieur de l'espèce : caractérisation phénotypique pour évaluer le potentiel des individus à déclencher une épidémie et caractérisation génétique pour évaluer la diversité des individus et déterminer s'ils sont plus inféodés à une entité (plante hôte, région...) qu'à une autre.

1-AGENTS RESPONSABLES DES MALADIES FOLIAIRES DE LA LUZERNE PORTE-GRAINE

Principales collaborations : FNAMS (L.M. Broucqsault, J. Hacquet, ingénieurs régionaux), UMR Epidémiologie végétale et écologie des populations (G. Raynal),

Mon premier contact avec les maladies des plantes (au-delà ce que j'avais appris lors de mes études à l'ENSAIA) a eu lieu lors de mon stage de fin d'études à la FNAMS (Fédération Nationale des Agriculteurs de Semences) à la station d'Etoile sur Rhône (1997). J'ai travaillé sur les maladies foliaires de la luzerne porte-graine (PG). Contrairement à la luzerne fourrage qui est coupée plusieurs fois et qui renouvelle donc ses parties aériennes plusieurs fois au cours d'une saison, la luzerne PG n'est pas coupée. Les maladies foliaires peuvent donc se développer pendant toute la période où les feuilles restent en place et entraîner une défoliation partielle ou complète des plantes, ce qui impacte fortement le rendement en graines. Plusieurs maladies fongiques foliaires peuvent attaquer la luzerne PG : afin de raisonner au mieux les applications fongicides il était nécessaire d'étudier le moment d'apparition de chaque maladie et de déterminer si les maladies étaient répandues de façon homogène ou si certaines étaient propres à certains bassins de production (sud-est, sud-ouest, centre-ouest).

Pendant 6 mois j'ai réalisé des prélèvements de luzerne PG sur des parcelles de la Drôme et j'ai réalisé des notations de symptômes foliaires. J'ai également évalué l'efficacité de traitements fongicides contre les maladies foliaires de la luzerne PG (A31, B2). Je réalisais l'identification des champignons pathogènes en comparant l'aspect des symptômes que j'observais avec ce qui était décrit sur des fiches illustrées et un livre sur les maladies des plantes fourragères. Quelques mois plus tard, en 1998, j'ai intégré l'INRA et j'ai continué à travailler sur les maladies de la luzerne PG en lien avec la filière fourrages. Grâce aux enseignements du professeur Guy Raynal j'ai acquis des compétences en pathologie végétale et mycologie. J'ai réalisé une enquête sur 3 années (700 tiges de luzerne au total) pour déterminer quelles étaient les maladies présentes en France sur luzerne

PG dans les 3 principaux bassins de production. Ainsi, dans le cadre des diagnostics que je devais établir, j'ai constaté que les symptômes que l'on attribuait systématiquement à *Stemphylium* sp. (cercles concentriques) étaient en fait dus à *Ascochyta imperfecta* (Fig. 1). En effet, grâce aux outils disponibles au laboratoire de Grignon, j'ai observé les pycnides sur les tâches concentriques et j'ai vérifié les postulats de Koch. En fait, *Stemphylium* sp. peut provoquer des symptômes sur luzerne, mais différents, et il se comporte surtout comme saprophyte sur les tâches créées par *A. imperfecta* (avec les outils disponibles à l'heure actuelle j'aurais pu faire une vérification avec une identification moléculaire). Globalement l'enquête a confirmé la présence de *Pseudopeziza medicaginis*, *A. imperfecta* (tous deux présents sur plus de la moitié des tiges analysées), *Stemphylium* spp., *Leptosphaerulina briosiana*, et *Uromyces striatus* (agent de la rouille présent sur un quart des tiges). L'enquête a révélé la présence de champignons pathogènes connus mais jusque-là peu ou pas détectés en France sur luzerne tels que *Leptotrochila medicaginis*, *Cercospora medicaginis*, and *Stagonospora meliloti*. *L. medicaginis* était principalement présent dans le bassin sud-ouest (A23).



Figure 1 : exemples de taches foliaires sur luzerne : pycnides d'*Ascochyta imperfecta* (A), pycnides de *Leptotrochila medicaginis* (B), conidiophores de *Stemphylium* sp.(C), apothécies de *Pseudopeziza medicaginis* (D).

Depuis cette période j'ai à cœur d'enseigner aux étudiants et aux stagiaires l'importance d'observer les formes de reproduction des champignons et de vérifier les postulats de Koch avant d'établir un diagnostic. C'est aussi depuis cette période que j'apprécie particulièrement l'observation des champignons et leurs formes de reproduction qui révèlent des structures étonnantes au microscope. J'aime transmettre mes connaissances en mycologie (enseignement Université, IUT, formations internes INRA) et faire découvrir la complexité insoupçonnée des structures invisibles à l'œil nu et expliquer leur rôle dans le cycle biologique d'un champignon. J'explique ainsi aux personnes que je forme qu'une tache sur une feuille n'est pas une vulgaire tache, c'est le signe d'un champignon phytopathogène qui se reproduit et qui s'apprête à se disséminer et qu'il suffit d'une seule spore microscopique viable pour déclencher une maladie sur la plante d'à côté ou sur une plante située beaucoup plus loin.

2-ÉTIOLOGIE DE LA FUSARIOSE DE L'AIL

Projets : Thèse Paul Chrétien (2018-2021), projet ROCAIL (2018)

Principales collaborations : filière professionnelle ail semences et ail consommation (Coopérative Alinéa (H. Hel, C. Vézian), Prosemail (H. Hunyadi, G. Reboul), Syndicat ail rose de Lautrec (A.L. Fuscien, G. Bardou), Avignon Université (UMR Qualisud, M. El Mataaoui, S. Laurent), UMR Agroécologie (V. Edel-Hermann), CTIFL (F. Villeneuve, P. Pierre).

Malgré un haut niveau d'exigence, les filières françaises de l'ail semences et de consommation sont touchées depuis le milieu des années 2000 par des pertes dues à des caïeux atteints par des champignons phytopathogènes du genre *Fusarium*. Les mêmes symptômes sont observés dans d'autres pays européens, ainsi qu'en Amérique du nord et en Inde depuis le début des années 2000. La fusariose semble être une maladie émergente dans toutes les zones de production d'ail.



Figure 2 : Tête d'ail coupée transversalement montrant des caïeux fusariés.

En France, pendant le stockage de l'ail (entre la récolte en juin et la plantation en octobre-janvier), les bulbes peuvent se ramollir et les caïeux prendre une coloration brune (Fig. 2), les rendant impropres à la consommation et inutilisables comme semences. Au départ en faibles proportions, la quantité de bulbes atteints n'a fait qu'augmenter pour atteindre 25% lors de la saison 2013-2014. Ces pertes sont une réelle menace pour la pérennité de la filière ail. A ce jour aucune méthode de protection testée ne s'est révélée efficace. La difficulté repose notamment sur le manque de connaissances sur l'étiologie et l'épidémiologie de cette maladie. Ainsi fin 2016, la filière ail a sollicité notre unité, pour trouver des solutions à leur problème. En 2017 j'ai réalisé des isollements sur ail rose symptomatique qui ont montré pour la première fois la présence de *F. proliferatum* sur ail en France (A3) et j'ai co-encadré un étudiant en master (P. Ricard) dans la recherche d'une méthode d'inoculation. Ces premiers résultats encourageants m'ont conduit à proposer d'encadrer un doctorant sur cette thématique et pour cela, début 2018, j'ai obtenu une ADR de l'ED 536. J'ai rédigé le projet scientifique qui a été soumis à l'ANRT pour financement, en collaboration avec les partenaires de la filière ail, et j'ai organisé les entretiens de recrutement du candidat. La bourse CIFRE a été accordée début mars 2018 à Paul Chrétien. Les objectifs de la thèse sont de 1)- établir l'étiologie de la maladie, 2)- caractériser les souches notamment du point de vue de leur pouvoir pathogène et 3)- mettre au point une méthode de détection moléculaire des souches agressives. Les premiers résultats des travaux de thèse montrent que *F. proliferatum* est l'espèce dominante, mais pas l'unique espèce, sur ail symptomatique. Les souches montrent une diversité d'agressivité

lorsqu'elles sont inoculées sur ail. Cette thèse est une première étape vers la mise au point d'une méthode de protection de l'ail contre la fusariose. Toutefois, elle doit être complétée par des recherches permettant de comprendre l'épidémiologie de la maladie et notamment de déterminer l'origine de l'inoculum et ses voies d'entrée dans la plante. Pour ce faire j'ai initié des projets connexes afin de générer une partie des informations complémentaires nécessaires. Dans le cadre du projet ROCAIL, nous avons récemment montré que *F. proliferatum* rentre par le plateau racinaire de la gousse d'ail. Au départ la partie sur la cytohistologie ne devait pas faire partie intégrante de la thèse, mais puisque cela était cohérent avec les travaux prévus (thématique, planning) et que cela apportait de nouvelles compétences à Paul Chrétien (collaboration avec le Pr M. El Maataoui), je lui ai demandé de s'y impliquer. Les résultats de ce projet vont faire l'objet du premier article de Paul qui sera soumis au premier semestre 2019. Je suis impliquée dans d'autres projets qui démarrent en 2019 et dont je parlerai dans la partie conclusion et perspectives.

3-SPECIALISATION D'HOTE CHEZ DES CHAMPIGNONS POLYPHAGES

Projets : SYSBIOTEL (2009-2012), SCLEROLEG (2012-2017)

Principales collaborations : UR Pathologie Végétale (K. Berthier, M. Bardin, P. Nicot), UE Alenya (B. Jeannequin, L. Parès), IGEPP (V. Faloya,) CTIFL (F. Villeneuve), Terres Inovia (A. Penaud), ACPEL, APEF (M. Benigni), CEFEL, INVENIO, SILEBAN, UNILET

Botrytis cinerea et *Sclerotinia sclerotiorum* sont répandus partout dans le monde. *B. cinerea* figure dans le top 10 des champignons ayant la plus grande importance économique et scientifique (Dean et al. 2012). Ces deux champignons ascomycètes sont extrêmement polyphages. Ils peuvent attaquer plusieurs centaines d'espèces chacun (Elad et al. 2016 ; Boland & Hall 1994), dont un grand nombre sont d'importance agronomique. Les pertes économiques sont liées à des pertes de rendement et de qualité. Les symptômes

peuvent apparaître, selon les cultures, en végétation et/ou en période de conservation.

La connaissance de la spécialisation d'hôte de ces deux agents pathogènes pourrait être d'une grande aide pour la lutte contre les maladies qu'ils provoquent, car les cultures considérées comme sensibles sont souvent cultivées simultanément à proximité ou successivement en



Figure 3 : (A) lésion sporulante de *Botrytis cinerea* sur tige de tomate et conidiophores, (B) sclérotés de *Sclerotinia sclerotiorum* sur melon et apothécies sur sclérotés.

rotation. En cas de manque de spécialisation d'hôte, l'inoculum aérien produit sur une espèce végétale, et disséminé par les courants d'air, pourrait induire des symptômes chez une autre espèce située à proximité. Ainsi, en cas de culture sous serre, la gestion des ouvrants devra prendre en compte non seulement le climat à l'intérieur de la serre, mais aussi une éventuelle entrée d'inoculum en provenance de l'extérieur. On peut limiter l'exposition d'une culture à l'inoculum en suspension dans l'air en séparant les cultures dans le temps. Cependant, *B. cinerea* et *S. sclerotiorum* produisent également des structures de survie telles que des sclérotés¹ (Fig. 3) et du mycélium dans des débris végétaux (Coley-Smith, 1980). Ainsi, en cas de manque de spécialisation d'hôte, l'inoculum laissé dans le sol par une espèce sensible pourrait servir d'inoculum primaire chez une espèce sensible suivante et provoquer ainsi une épidémie de pourriture grise ou de pourriture blanche.

3-1 Spécialisation d'hôte : cas de *B. cinerea*

Certaines études ont montré que la plante hôte était un facteur structurant chez *B. cinerea*, plus que la distance géographique (Walker et al. 2015b). Ainsi, pour tester l'hypothèse selon laquelle *B. cinerea* montre une spécialisation d'hôte sur la tomate et la laitue, nous avons caractérisé 42 souches collectées sur tomate et 44 souches collectées sur laitue (stages de master : F. Bryone et A Pinault). Pour gommer totalement l'effet géographique, les laitues et les tomates ont été cultivées simultanément dans le même abri



Figure 4 : cultures conjointes de laitues (bords du tunnel) et de tomates (centre du tunnel)

froid (Fig. 4). J'ai génotypé les souches à l'aide de 9 marqueurs microsatellites (Fournier et al. 2002) et j'ai calculé plusieurs indices de diversité afin de comparer les souches issues de tomate à celles issues de laitue. De plus l'agressivité des souches a été évaluée.

Les résultats de cette étude ont montré que les souches de *B. cinerea* collectées sur laitues présentaient une richesse allélique et une diversité génique significativement plus élevées chez les souches collectées sur tomate ($P = 0,01$). Elles présentaient également une diversité haplotypique supérieure à celles des souches collectées sur tomate (0.69 vs 0.37). Les deux groupes de souches montraient la même valeur de déséquilibre de liaison ($rd = 0.13$) c'est-à-dire le même niveau de clonalité (reproduction asexuée).

¹ Sclérote : amas mycélien formé par certains champignons pour résister en milieu hostile.

L'analyse de structuration génétique a révélé une division claire des souches en deux groupes. Cependant, cette structure ne séparait pas les souches en fonction de leur hôte d'origine. Ce résultat est consolidé par la répartition des souches dans un arbre phylogénétique : les souches collectées sur tomates et les souches collectées sur laitues sont dispersées dans l'arbre (Fig. 5). Du point de vue phénotypique, nos résultats ont montré une capacité de toutes les souches de *B. cinerea* examinées à attaquer à la fois la tomate et la laitue. Les souches de *B. cinerea* collectées sur tomate étaient significativement plus agressives que les souches collectées sur laitue lorsqu'elles étaient inoculées sur des plantes de tomate ($P = 0,001$), mais aucune différence significative d'agressivité n'a été observée lorsque les souches ont été inoculées sur de la laitue ($P = 0,17$) ou sur une pomme ($P = 0,87$).

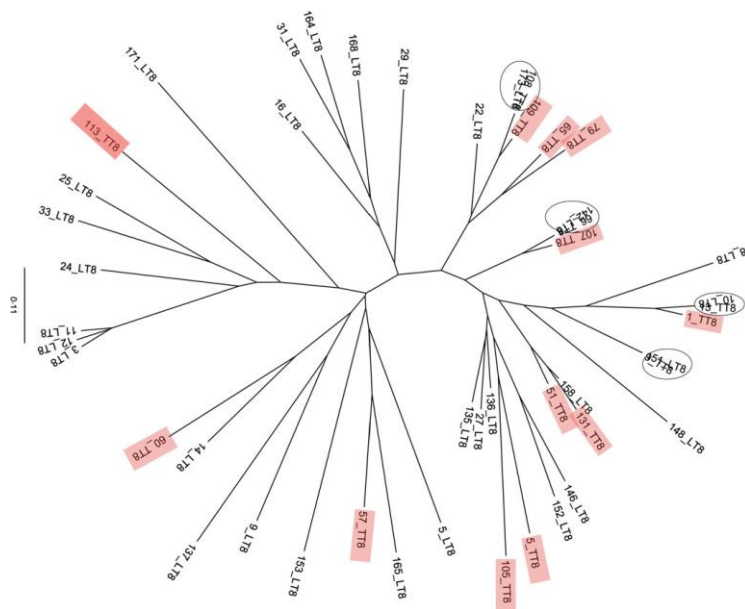
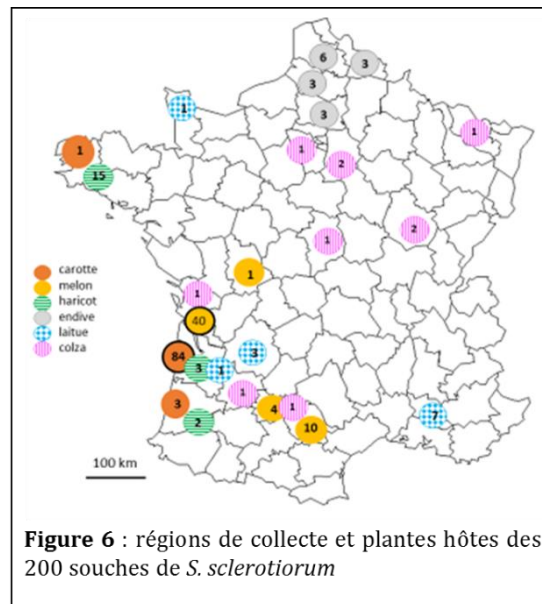


Figure 5 : relations génétiques entre les 31 souches de *B. cinerea* provenant de laitue et les 16 souches récoltées sur tomate (cases rouges). Les cercles identifient les haplotypes communs aux souches collectées sur laitue et tomate.

En conclusion, la spécialisation des souches observée au niveau génétique ne se traduit pas systématiquement par une différence au niveau de leur agressivité. Cela signifie que l'inoculum produit sur une espèce hôte pourrait déclencher une épidémie de pourriture grise sur les autres espèces. Ces résultats ont des conséquences sur le risque encouru dans les rotations impliquant de la tomate et de la laitue, et devront être pris en compte dans l'agencement des cultures sur une exploitation afin d'éviter le transfert d'inoculum.

3-2 Spécialisation d'hôte : cas de *S. sclerotiorum*

L'incidence de la pourriture blanche causée par *S. sclerotiorum* a récemment augmenté en France, en particulier dans les cultures de melon, qui n'avaient guère été touchées dans le passé. L'une des explications possibles de cette situation est l'apparition de souches présentant des caractéristiques particulières, notamment une agressivité accrue à l'égard du melon. Or, on connaît très peu de choses sur les différences d'agressivité de souches de *S. sclerotiorum* sur différents hôtes. Cependant, différents niveaux d'agressivité parmi 120 souches ont été observés



sur tournesol en Australie (Ekins et al. 2007). De plus, des cas de divergence génétique entre populations séparées ont été reportées dans plusieurs études (Aldrich-Wolfe et al. 2015; Clarkson et al. 2013; Malvárez et al. 2007). Afin de vérifier notre hypothèse sur melon, dans le cadre du projet SCLEROLEG, 200 souches de *S. sclerotiorum* ont été collectées sur six cultures hôtes (haricot, colza, carotte, laitue, melon, endive) dans différentes régions (Fig. 6). Les souches ont été génotypées à l'aide de 16 marqueurs microsatellites (Sirjusingh & Kohn 2001). Une DAPC (discriminant analysis of principal components, Jombart et al. 2010) a été réalisée par K. Berthier afin de déterminer la structuration génétique de ces souches. Cette méthode a été utilisée car elle est nettement moins biaisée que celle du logiciel Structure pourtant très largement utilisé.

Au total, 128 profils haplotypiques différents (MLH) ont été identifiés, parmi lesquels 35 étaient représentés par au moins 2 souches. Le MLH le plus fréquent était représenté par 8 souches (toutes issues de carottes). Dix des MLH en multicopies étaient représentés par des souches prélevées sur différentes plantes hôtes, y compris le melon (Fig. 7). Les 3 groupes génétiques identifiés par DAPC n'étaient pas structurés par la plante hôte mais suggéraient plutôt un isolement par la distance (A4). La comparaison spécifique de souches collectées sur melon et sur carotte provenant de départements adjacents (Gironde et Charente-Maritime) a jeté un doute supplémentaire sur l'hypothèse initiale de cette étude. Elle a montré que le melon et la carotte, souvent cultivés en rotation ou à proximité immédiate dans cette région, pouvaient être infectés par des isolats avec un haplotype identique à des périodes séparées de plusieurs mois, suggérant un échange d'inoculum dans le temps et dans l'espace à une échelle de 100 km.

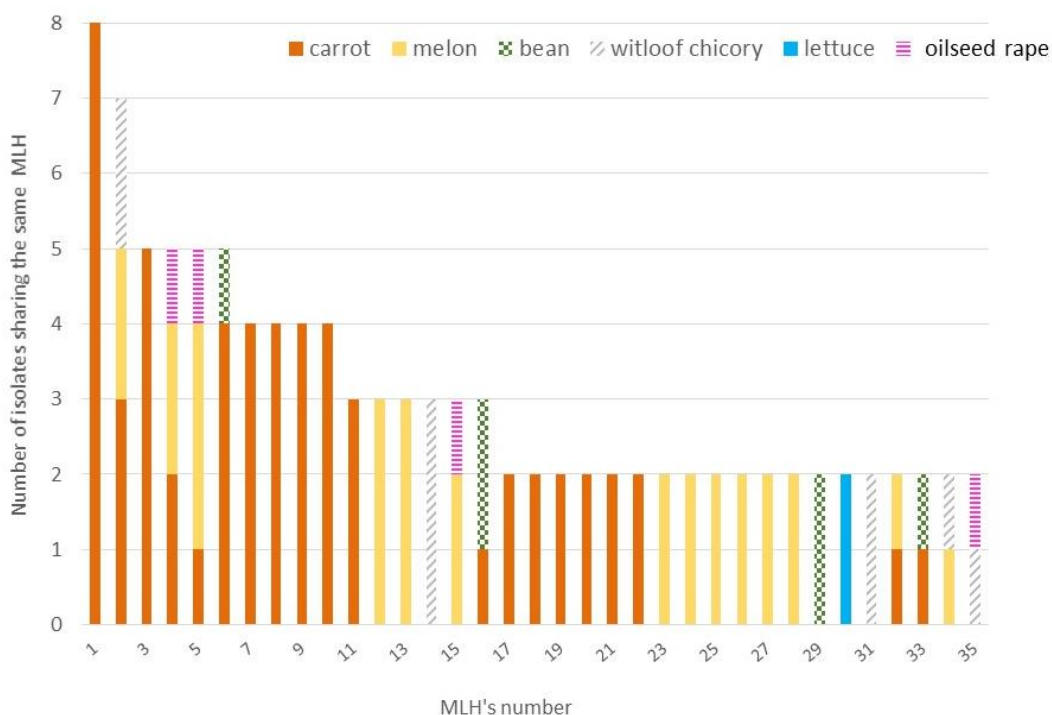


Figure 7 : Plante hôte d'origine des souches ayant des profils haplotypiques identiques.

Un sous-échantillon de 96 souches a été évalué pour son agressivité sur les feuilles de melon. Dans l'ensemble, les souches issues de melon n'ont pas montré d'agressivité supérieure sur les feuilles de melon par rapport à celles provenant d'autres plantes hôtes.

En conclusion, les résultats de cette étude n'ont pas confirmé l'apparition de souches présentant des caractéristiques particulières, notamment une agressivité accrue à l'égard du melon. Ainsi le melon ne peut pas être utilisé comme culture alternative à faible risque dans les stratégies de rotation pour lutter contre la pourriture blanche. D'autres hypothèses peuvent être envisagées, notamment le rôle possible de l'augmentation de la fréquence des isolats résistants aux fongicides observée en France ces dernières années (Walker et al. 2015a), ce qui entraîne une réduction de l'efficacité du contrôle sur le terrain. Une augmentation de la superficie cultivée en cultures sensibles (par exemple le colza) dans le sud et le centre-ouest de la France, ainsi qu'une réduction du temps de rotation entre les cultures sensibles peuvent également avoir joué un rôle. Les cultures de melon elles-mêmes peuvent être des contributeurs substantiels d'inoculum, car les fruits symptomatiques ne sont pas cueillis à la récolte. Si on les laisse se dégrader sur place, ces fruits produiront probablement un grand nombre de sclérotés, ce qui pourrait ensuite contribuer à la charge d'inoculum du sol pour les cultures suivantes sur plusieurs années et éventuellement pour les cultures des parcelles voisines. Dans ce contexte, il pourrait être particulièrement utile de prendre des mesures pour réduire la quantité d'inoculum libéré sur le sol par les plantes malades, en éliminant les melons pourris après la récolte ou en appliquant des agents de lutte biologique capables de détruire les sclérotés fraîchement produits.

4- ESPECES CRYPTIQUES

Historiquement, l'identification des espèces fongiques se faisaient sur la base de critères morphologiques. Or, il existe des espèces fongiques, très proches du point de vue morphologique qui ne peuvent pas être différenciées sur ce critère (elles sont dites cryptiques), qui peuvent présenter des traits d'histoire de vie (THV) impliqués dans le développement épidémique (croissance mycélienne, sporulation, reproduction sexuée) qui diffèrent. Ainsi, si ces THV ne sont pas correctement pris en compte pour raisonner les traitements ou dans les modèles de prévision des risques, cela pourrait compromettre l'efficacité des méthodes de lutte. Depuis l'avènement de la biologie moléculaire, les outils permettant l'identification des espèces fongiques ont nettement évolué. Ils permettent désormais de différencier certaines espèces identiques du point morphologique.

4-1 *S. sclerotiorum* et *S. subarctica*

Les symptômes de pourriture blanche peuvent être causés par plusieurs espèces, dont *S. subarctica*, une espèce principalement présente sous les latitudes septentrionales qui vit en sympatrie avec *S. sclerotiorum*. Bien que les deux espèces ne puissent être distinguées sur la base de critères morphologiques, *S. subarctica* semble avoir besoin de conditions climatiques différentes pour sa croissance mycélienne et sa production d'apothécies (Clarkson et al. 2016). Ces différences peuvent affecter la précision des modèles de prédiction de risque de pourriture blanche qui sont basés sur la production d'ascospores par *S. sclerotiorum*.

Pour évaluer la présence de *S. subarctica* en France, nous avons adapté un test PCR rapide pour distinguer *S. subarctica* des autres espèces de *Sclerotinia* communément rencontrées. Ce test a été utilisé pour caractériser une collection de 969 isolats de *Sclerotinia sp.* provenant de plantes (haricot, colza, carotte, laitue, melon, endive), d'air et de sol dans différentes régions de France (A5). Une souche de référence de *S. subarctica* collectée en Angleterre nous a été fournie par J. Clarkson (2013).

Un seul isolat, prélevé sur endive au nord de la France, a été identifié comme *S. subarctica*. Lorsque cet isolat a été génotypé avec 5 marqueurs microsatellites spécifiques de *S. sclerotiorum*, son profil haplotypique était clairement distinct de celui des autres isolats. La séquence ITS de cet isolat était identique à celle des isolats de *S. subarctica* prélevés en Europe du Nord et en Alaska. Les postulats de Koch ont été vérifiés. L'isolat identifié comme *S. subarctica* a produit des symptômes de pourriture blanche lorsqu'il a été inoculé sur endive. Cette étude est la première à signaler la présence de *S. subarctica* au sud du 51^e parallèle nord et sur endive (A5).

4-2 *B. cinerea* et *B. pseudocinerea*

Sur la base de critères phylogénétiques, biologiques, morphologiques et écologiques, deux espèces vivant en sympatrie, *B. cinerea* et *B. pseudocinerea*, ont été distinguées par Walker et al. (2011). Aucun des critères morphologiques testés (taille des spores, taux de germination ou croissance mycélienne) ne permet de les discriminer. En revanche, les souches de *B. pseudocinerea* sont naturellement résistantes au fongicide fenhexamid mais hypersensibles à d'autres (fenpropidin et fenpropimorph notamment). Lorsque génotypées, elles peuvent être facilement identifiées car elles présentent un allèle privé sur le locus BC6 (allèle qui n'est jamais trouvé dans les souches de *B. cinerea*) (Walker et al. 2011).

Ainsi, dans mes études de populations de *B. cinerea* sur plantes, dans l'air et dans le sol j'ai tenu compte de la présence de *B. pseudocinerea*. A l'aide de l'allèle privé j'ai pu identifier et évaluer la proportion de *B. pseudocinerea* dans les populations de souches *B. cinerea*-like (tableau 1). Les proportions de *B. pseudocinerea* observées dans nos différentes études sont cohérentes avec ce qui est mentionné dans les publications concernant l'inoculum collecté sur diverses espèces de plantes. *B. pseudocinerea* représentait respectivement moins de 10 et 14,5% des isolats échantillonnés sur des vignes en France et en Nouvelle-Zélande (Walker et al. 2013; Johnston et al. 2013), 14% des isolats provenant de fraises, de framboises et de colza en Hongrie (Fekete et al. 2012) et jusqu'à 8% sur fraise (Plesken et al. 2015).

Tableau 1 : abondance de souches de *B. pseudocinerea* dans différents compartiments explorés.

Nb de souches	Compartiment d'origine	Localisation	% de souches <i>B. pseudocinerea</i>	référence
683	Air	Avignon	9.8%	A11
174	Laitue	Avignon	1.7%	A12
67	Laitue	Alenya	2.9%	A10
44	laitue	Avignon	0	A9
174	Tomate	Algérie	2.3%	A14
42	Tomate	Avignon	0	A9
66	Sol	Alenya	0	A10
109	Environnement	France	8.2%	A6

5- CONCLUSION ET PERSPECTIVES

5-1 Perspectives étiologie et épidémiologie de la fusariose de l'ail.

A la fin de la thèse de Paul Chrétien nous devrions avoir pour la première fois, une vision assez claire des espèces engendrant la fusariose sur ail en France, ainsi que de la diversité intraspécifique chez *F. proliferatum*. De plus, une méthode de détection des souches pathogènes sur différents substrats (sol, air, plantes) sera mise au point. Pour progresser vers une méthode efficace et durable de protection de l'ail contre la fusariose il est nécessaire d'élucider l'épidémiologie de la maladie, ce que je vais contribuer à faire dans le cadre de différents projets.

5-1-1 Projet SYNERGIES (2019-2022)

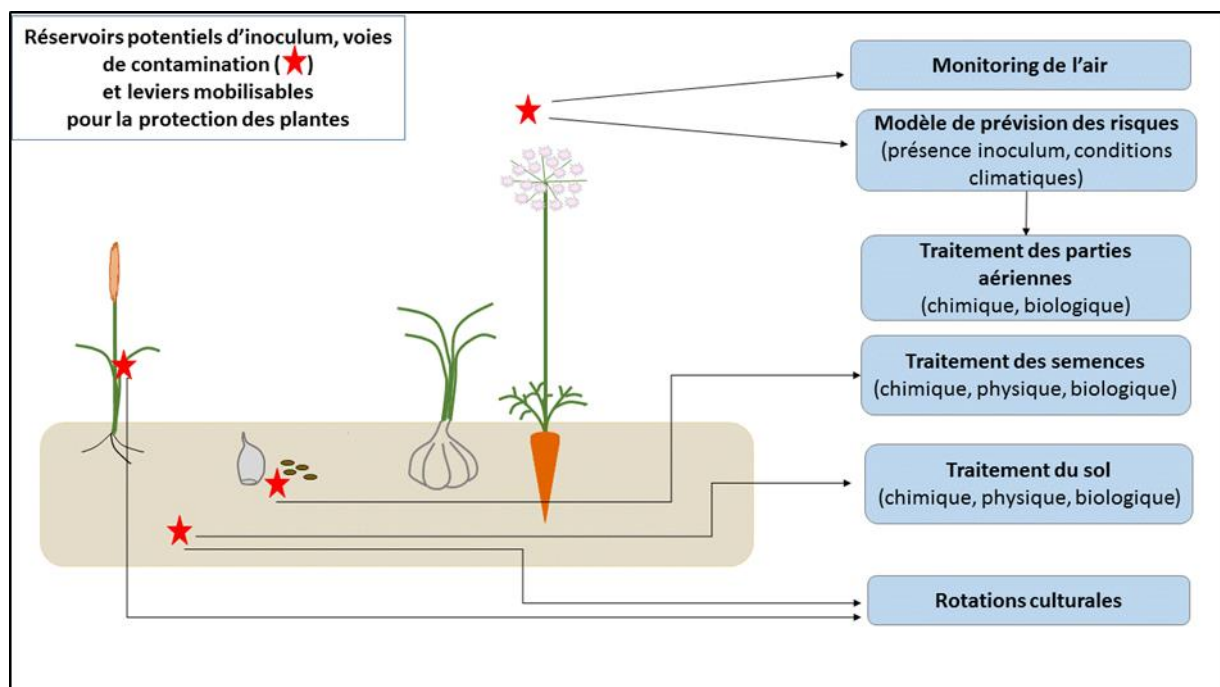
A partir de 2019 je suis impliquée dans le projet SYNERGIES porté par l'ACTA, impliquant notamment des unités de recherche INRA, des instituts techniques et des réseaux d'expérimentation: « Maîtriser les fusarioses dans les systèmes légumiers (melon et ail) selon la diversité des sols. Proposition de leviers agronomiques et écologiques en SYNERGIE avec les potentialités des contextes pédoclimatiques et des systèmes de culture conventionnels et biologiqueS ». L'objectif général du projet consiste à gérer les maladies telluriques provoquées par *Fusarium* spp. en cultures légumières, en mobilisant les principaux leviers agro-écologiques, en fonction du contexte pédoclimatique et des systèmes de culture.

En ce qui me concerne, je vais caractériser des souches de *F. proliferatum* pour leurs traits d'histoire de vie impliqués dans le développement de la maladie (croissance mycélienne, sporulation, agressivité....) par rapport à des facteurs abiotiques (pH, température, activité de l'eau....). Dans les articles publiés on trouve un certain nombre de first report sur *F. proliferatum* sur ail mais il en existe très peu sur la caractérisation phénotypique des souches. Mon objectif est de déterminer si les souches pathogènes de l'ail présentent une diversité de comportement par rapport à ces facteurs abiotiques. Nous pouvons prendre l'exemple de la croissance mycélienne par rapport à la température. Les résultats préliminaires que j'ai obtenus (qui doivent être confirmés par des répétitions) tendent à montrer que *F. proliferatum* pousse très bien à 30°C (aussi bien qu'à 20°C). Or, lors de la période de stockage des gousses d'ail, de l'air chaud est généralement propulsé à l'intérieur des palox. Cela pourrait potentiellement être un facteur aggravant dans l'apparition des symptômes de fusariose lors du stockage. Autres exemple, si les souches de *F. proliferatum* présentent des comportements variables en fonction du pH, cela peut conduire à conseiller certains terroirs pour la culture de l'ail et à en écarter certains. Tout cela, bien sûr, ne constitue que des pistes. Pour que des modifications de pratiques soient adoptées in fine il faut qu'elles soient cohérentes avec les contraintes socio-économiques des filières

concernées, d'où l'intérêt de travailler en collaboration avec des collègues socio-économistes ou des acteurs de terrain.

5-1-2 Projet OCARINA (2019-2021)

En 2019 démarre également le projet OCARINA (Identification des agents pathogènes et de l'origine de l'inoculum engendrant la fusariose sur l'ail et la carotte semences) dont je suis à l'initiative et dont je suis co-porteuse. C'est un projet, financé par le département SPE, dont l'objectif global est l'acquisition de connaissances sur l'étiologie et l'épidémiologie des fusarioses émergentes sur l'ail semences et la carotte porte-graine, afin de mettre au point une méthode de lutte raisonnée et durable pour garantir la qualité des semences. En collaboration avec P. Poupard (IRHS, Angers) et V. Edel-Hermann (UMR Agroécologie, Dijon), nous proposons d'identifier les espèces fongiques engendrant les fusarioses et d'explorer les compartiments sol, air et plantes (espèces en rotation) pour identifier les réservoirs potentiels d'inoculum. Pour cela, deux approches seront utilisées : i) une approche de microbiologie classique pour isoler les champignons du genre *Fusarium* à partir d'ail et de carotte symptomatiques, les identifier et vérifier leur caractère pathogène et ii) une approche moléculaire de metabarcoding ciblant le genre *Fusarium* permettant d'analyser un grand nombre d'échantillons, pour identifier les espèces potentiellement pathogènes dans le sol et l'air, et les plantes cultivées en rotation avec l'ail et la carotte.



A la fin du projet nous espérons notamment avoir identifié des réservoirs à surveiller (sol, air...), évalué le rôle des espèces cultivées en rotation comme réservoir potentiel d'inoculum (repenser les rotations si nécessaire), et enfin avoir déterminé les étapes du cycle biologique des cultures à surveiller (modification potentielle des itinéraires techniques) et sur lesquelles l'effort de protection (biologique ou chimique) doit être positionné pour limiter le développement des fusarioses.

Au-delà du projet OCARINA, de nouvelles pistes pourront être explorées et de nouveaux projets élaborés :

- Exploration des réservoirs de plantes relais sauvages comme réservoirs potentiels d'inoculum (carottes sauvages, alliacées sauvages etc...)
- Définition de pistes pour la création de nouvelles variétés d'ail et de carotte en fonction des portes d'entrée de l'inoculum. Proposition d'une gamme de souches /espèces de *Fusarium* d'agressivités différentes pour la sélection variétale.
- Définition d'une démarche d'épidémiologie.
- Exploration de méthodes de lutte, en mettant l'accent sur les méthodes alternatives à l'usage des fongicides et en particulier en développant les produits de bio-contrôle ou issus d'extraits de plantes. A noter que l'IRHS et l'unité de Pathologie Végétale développent des activités de recherche autour du bio-contrôle.

5-2 Caractérisation génétique

Grâce aux nouveaux outils d'identification des espèces et de caractérisation des individus, on peut décrire de plus en plus finement les populations d'agents pathogènes. En 20 ans de carrière j'ai vu une évolution significative des outils disponibles : au début de ma carrière je comparais des symptômes à des photos pour identifier un genre fongique, voire une espèce, et maintenant je peux distinguer deux individus au sein d'une même espèce et calculer leur degré de parenté.

Ces nouvelles données apportent des informations pour la gestion des rotations et l'organisation des différentes cultures sur une exploitation mais aussi à plus large échelle car comme nous allons le voir dans une prochaine partie, l'inoculum peut voyager à longue distance. Ces connaissances sur les populations pourront permettre de construire des modèles de prévisions des risques épidémiques plus précis : dans l'idéal ils pourraient prévoir non seulement la quantité d'inoculum mais aussi la « dangerosité » de celui-ci. En effet les modèles de prévision des risques qui sont présentés dans les publications sont basés sur la quantité de spores et sur les conditions climatiques. Cependant on peut imaginer une situation où dans l'air se trouve une grande quantité

de spores, mais que l'agressivité des souches représentées par ces spores est nulle ou très limitée. Le risque est alors potentiellement limité. A contrario, quelques spores dans l'air présentant une très forte agressivité et/ou une grande capacité à sporuler peuvent déclencher une épidémie qui sera très dommageable. Ainsi, en plus de la quantité de spores et des conditions climatiques, il faudrait aller vers des modèles de prévision des risques incluant les caractéristiques phénotypiques de l'inoculum. Pour cela il me semble qu'une première étape serait la mise au point d'outils de monitoring permettant de quantifier l'inoculum aérien (cela existe déjà) et de le caractériser en temps réel (ou dans un laps de temps réduit).

Par exemple concernant l'espèce *B. pseudocinerea*, dont on sait qu'elle présente une résistance naturelle à certains fongicides, il sera intéressant d'en tenir compte dans la prévision et la gestion des risques de pourriture grise. Pour cela il faudrait un système de monitoring (air sampler + qPCR ou LAMP) capable de détecter l'allèle privé de *B. pseudocinerea* par exemple.

Concernant *B. cinerea*, j'aimerais trouver un marqueur moléculaire de la vitesse de croissance mycélienne. En effet, j'ai constaté, ainsi que mes autres collègues qui travaillent sur *B. cinerea* au labo, que sa vitesse de croissance mycélienne est significativement corrélée à son agressivité. Si l'on disposait d'un tel marqueur, on pourrait l'inclure dans des systèmes de monitoring permettant de quantifier l'inoculum et de le caractériser pour son agressivité. C'est un des projets que j'ai en tête et que je souhaite monter dans un futur proche.

On peut aussi imaginer utiliser une démarche GWAS (Genome Wide Association Study - Etude d'association pangénomique) qui porte sur l'analyse de nombreux polymorphismes chez des individus afin de trouver des corrélations avec des phénotypes particuliers. Pour cela il faudrait disposer d'un grand nombre de souches phénotypées pour leur agressivité (nous avons cela dans nos collections), puis rechercher des SNP liés à ce caractère. A l'heure actuelle il n'existe aucun article faisant état d'une GWAS sur des souches de *Botrytis* ou de *Sclerotinia*.

IDENTIFIER LES RESERVOIRS D'INOCULUM

Identifier où se situent les sources d'inoculum est essentiel pour comprendre l'épidémiologie des maladies et à terme, prévoir les risques épidémiques dans des régions d'intérêt. Localiser les sources d'inoculum est d'autant plus difficile que les champignons ont une large gamme d'hôtes et qu'ils ne sont pas inféodés à un seul compartiment (air ou sol notamment). La difficulté peut également résider dans le fait que certains champignons ne produisent pas de symptômes pendant tout ou partie de leur cycle biologique. Enfin, plus les connaissances progressent sur les microorganismes phytopathogènes, plus on réalise qu'il faut prendre en compte ce qui se situe en dehors des parcelles agricoles pour comprendre les phénomènes épidémiologiques (Morris et al. 2009). En effet, la vision agro-centrée de la vie des agents pathogènes est incohérente eu égard à la capacité de nombre d'entre eux de vivre en tant que saprophytes sur divers substrats. Ces différents aspects sont abordés dans cette partie.

1-INOCULUM DANS LES SEMENCES DE GRAMINEES FOURRAGERES

Projet : CTPS (2002-2004)

Collaborations : UMR Epidémiologie végétale et écologie des populations (Pr. Guy Raynal, référent), FNAMS (F. Deneufbourg, B. Mériaux), Filière fourrages.

Dans la première partie de ma carrière mes activités portaient sur l'étude de champignons pathogènes des graminées fourragères du genre *Epichloe* (anamorphe *Neotyphodium*). Ces ascomycètes clavicipitacées ont la particularité d'avoir un cycle biologique incluant une phase endophyte (asymptomatique dans les tissus végétaux) et une phase épiphyte produisant des stromas mycéliens qui étouffent les inflorescences et qui impactent fortement le rendement en production de semences (B1). Certaines espèces ont perdu la faculté de faire de la reproduction sexuée et sont strictement endophytes comme par exemple *Neotyphodium lolii* sur ray-grass. Ces champignons, à l'instar de leur cousin *Claviceps purpurea* (ergot du seigle), produisent des alcaloïdes qui permettent aux plantes qui les abritent de mieux résister à certains stress biotiques (insectes notamment). L'association avec l'endophyte permet aussi à la plante de mieux résister à certains stress abiotique comme la sécheresse. Cependant les alcaloïdes ont un effet délétère sur la santé des animaux qui consomment les fourrages (allant jusqu'au décès). Ainsi pour qu'une variété de graminée fourragère soit inscrite au catalogue, le CTPS (Comité Technique Permanent de la Sélection) recommande que les semences commerciales contiennent moins de 20% de semences contaminées (Gensollen et al. 2005).

J'ai donc mené des travaux pour identifier les espèces porteuses de *Neotyphodium* sp. et pour éliminer les endophytes des semences de deux plantes fourragères majeures, le ray-grass (*Lolium*

perenne) et la fétuque élevée (*Festuca arundinacea*). De plus j'ai recherché les sources d'inoculum d'*E. typhina* pathogène sur dactyle.

1-1 Endophytes stricts du genre *Neotyphodium* dans les semences

Afin d'améliorer la connaissance des champignons de type *Neotyphodium* dans les graminées européennes, j'ai recherché par coloration et microscopie le mycélium endophyte caractéristique (Fig. 8) dans 93 échantillons de plantes vivantes (13 genres et 22 espèces collectés à proximité de pâturages permanents ou le long de sentiers en France) et dans 489 échantillons de semences (63 genres, 237 espèces, reçus de 24 jardins botaniques européens) (A24, B1). Les résultats ont montré que le mycélium de *Neotyphodium* sp. était présent dans les gaines des feuilles de quatre genres, en particulier chez

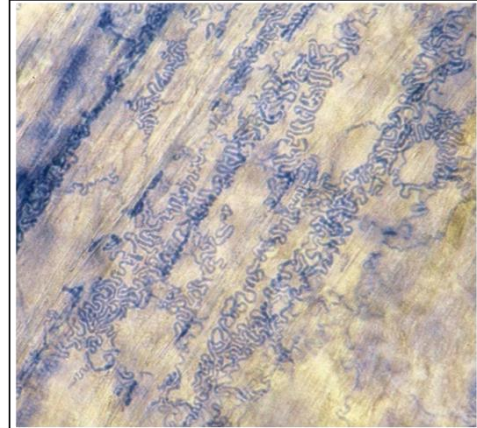


Figure 8 : mycélium caractéristique de *Neotyphodium* sp.

Festuca et *Lolium* spp. Ils suggèrent que les endophytes étaient présents le plus souvent dans les régions du sud où les plantes pourraient souffrir de la sécheresse estivale. En ce qui concerne les semences, *Neotyphodium* sp. a été trouvé dans les graines de six genres (22 espèces), en particulier *Festuca* (15 espèces) et *Lolium* (3 espèces). Un mycélium de type *Neotyphodium* a été détecté pour la première fois chez 6 autres espèces de *Festuca* ainsi que chez *Vulpia ciliata* et *Micropyrum tenellum*.

Afin de cadrer avec les recommandations du CTPS, en collaboration avec la FNAMS, nous avons recherché des méthodes pour éliminer les *Neotyphodium* spp. des semences de ray-grass et de fétuque. Nous avons testé des traitements fongicides ainsi que la thermothérapie sèche. Dans les deux cas le meilleur équilibre entre l'éradication des endophytes et le maintien de la viabilité des semences a été recherché. Les tests réalisés en serre et au champ ont permis d'identifier un fongicide efficace et conservant une bonne viabilité des semences (A22, B1). Les résultats montrent que la thermothérapie sèche n'est pas efficace en dessous de 80°C. Cette température doit être appliquée au moins pendant 4 jours (jusqu'à 9 jours) pour éliminer *Neotyphodium* tout en maintenant une viabilité des semences acceptable. L'élimination des endophytes dans les semences de graminées en cours de sélection permet d'obtenir les générations suivantes exemptes d'endophytes.

1-2 *E. typhina* sur semences et plantes de dactyle

Contrairement aux endophytes stricts, *E. typhina* a conservé la capacité de faire de la reproduction sexuée. Ainsi sur dactyle, *E. typhina* est sous forme endophyte lorsque la plante est sous forme végétative. Lorsque le dactyle monte à graine, le mycélium suit la progression de l'inflorescence

et se multiplie jusqu'à produire un stroma mycélien qui enserre complètement l'inflorescence (Fig. 9). Le dactyle ne produit alors plus de graines ce qui est un souci majeur en culture porte-graine. Le stroma mycélien (appelé quenouille du fait de sa forme) est d'abord blanc. A ce stade il produit des conidies. Des diptères viennent pondre sur le stroma et les larves qui éclosent se nourrissent du mycélium. *E. typhina*



Figure 9 : Stromas mycéliens d'*E. typhina* sur dactyle enserrant les inflorescences (stade blanc, production de spermaties et stade orange production d'ascospores)

étant hétérothallique, pour qu'un stroma A puisse passer en phase de reproduction sexuée il faut qu'une conidie d'un stroma B l'atteigne. Le rôle de transporteur de conidies est joué par les diptères (Schardl 1996). Lorsque le stroma est fécondé il devient orange et des périthèces sont formés. Lorsque la tige de dactyle, et donc le stroma, est turgescent des ascospores sont éjectées. J'ai cherché à élucider quel était l'inoculum qui provoquait les épidémies dans les champs de dactyle. La première hypothèse était la présence du champignon dans les semences, comme pour les endophytes stricts. J'ai donc analysé 440 graines issues d'inflorescences partiellement quenouillées (car il n'y a pas de mycélium dans les graines issues d'inflorescences saine chez le dactyle). 53% des graines d'inflorescences partiellement quenouillées présentaient du mycélium typique d'*E. typhina*. Sur les 480 plantules obtenues à partir des graines, aucune n'était porteuse de mycélium endophyte (A20, B1). Ainsi, contrairement aux endophytes stricts, *E. typhina* n'est pas transmis à la plantes via les semences.

La seconde hypothèse était l'intervention d'un inoculum aérien dont je ne m'expliquais pas l'origine à l'époque. En effet n'ayant pas encore commencé à travailler dans le domaine de l'aérobiologie je n'avais pas conscience qu'un inoculum aérien pouvait provenir de dizaines voire de centaines ou de milliers de kilomètres. Ainsi pour des champs a priori « isolés » je ne voyais pas d'où pouvait venir l'inoculum. J'ai quand même inoculé des dactyles avec des conidies et des ascospores. L'inoculation avec conidies ainsi que l'inoculation de plaies de coupe avec des ascospores n'ont pas été concluantes (stage master C. Georget). En revanche l'inoculation de méristèmes a permis de produire 11% de talles endophytés (présence du mycélium

caractéristique dans les tissus) (B1, A20, A21, A29). Je n'ai pas eu le temps d'approfondir ces résultats car c'est à cette période que j'ai réalisé une mutation géographique et thématique. Les voies d'infection du dactyle par *E. typhina* n'ont jamais été complètement élucidées jusqu'à présent. Certains articles indiquent un potentiel rôle du miellat d'insectes favorisant la germination des ascospores et leur pénétration dans les tissus végétaux (Alderman 2013).

2-INOCULUM DANS LES COMPARTIMENTS AERIEN ET TELLURIQUE

Projet : SPE Aérobiologie (2010), SYSBIOTEL (2009-2012), SCLEROLEG (2012-2017), SPE Nouveaux Habitats (2005-2006)

Collaborations principales : Pathologie Végétale (M. Bardin, C. Morris, P. Nicot), IGEPP (V. Faloya), UE Alenya (B. Jeannequin, L. Parès), CTIFL (F. Villeneuve), APEF (M. Benigni), ACPEL (J.M. Lhote)

Pour aborder la question de l'importance de l'inoculum aérien versus celle de l'inoculum tellurique dans l'épidémiologie d'une maladie, l'étude de *B. cinerea* et *S. sclerotiorum* est particulièrement intéressante. En effet, bien que très proches du point de vue taxonomique, ces deux discomycètes diffèrent notablement par leur capacité à produire des conidies (Amselem et al. 2011). En conditions favorables *B. cinerea* sporule abondamment, pouvant produire plusieurs millions de conidies par centimètres carrés de lésions en quelques jours (Nicot et al. 1996). Ces spores issues de mitose représentent une reproduction à l'identique de l'individu d'origine. En conditions moins favorables, *B. cinerea* peut se conserver dans le sol sous forme de mycélium dans les débris végétaux et il peut également produire des sclérotés qui peuvent générer des apothécies libérant des ascospores. Ces spores issues de méiose représentent la production de nouveaux individus. Dans la gestion des risques épidémiques de pourriture grise, la phase tellurique de *B. cinerea* a tendance à être sous-estimée. Cela est peut-être dû au fait qu'en Europe méridionale, les sclérotés de *B. cinerea* ne produisent (presque) jamais d'apothécies. Il n'en reste pas moins que les sclérotés peuvent germer et produire du mycélium pouvant attaquer les plantes.

Contrairement à *B. cinerea*, *S. sclerotiorum*, ne produit pas de conidies mais seulement des ascospores issues des apothécies portées par les sclérotés. Ses sclérotés peuvent également produire directement du mycélium et attaquer les plantes. Ainsi, dans la gestion des risques épidémiques de pourriture blanche, sa phase aérienne a tendance à être sous-estimée.

2-1 Inoculum aérien vs inoculum tellurique: cas de *B. cinerea*

La première question à laquelle nous avons souhaité répondre concernait la présence d'inoculum de *B. cinerea* dans l'air de la région d'Avignon (Vaucluse), et plus particulièrement d'inoculum viable. Dans les articles d'aérobiologie concernant les champignons phytopathogènes et la prévision des risques épidémiques, c'est souvent l'inoculum aérien total qui est mentionné, or, seul l'inoculum viable peut déclencher une épidémie et donc présenter un réel danger pour les plantes. Ainsi nous avons voulu savoir si l'abondance de cet inoculum viable présentait une saisonnalité. Pour cela, j'ai collecté de l'inoculum de *B. cinerea* pendant 84 jours répartis sur 3 années (sept 2007-nov 2010) à l'aide d'un échantillonneur d'air à haut débit



Figure 10 : échantillonneur d'air à haut débit (Burkard)

(500 L.min⁻¹; Fig. 10) placé sur le site de l'unité de Pathologie Végétale, sans cultures hôtes sensibles à proximité. Dans l'échantillonneur, les particules aériennes aspirées tombent sur un milieu semi-sélectif (BSTM, Edwards & Seddon 2001) puis à partir du nombre de colonies de *B. cinerea* qui poussent sur la boîte de Petri on peut en déduire le nombre de UFC/m³ (unité formant colonie) d'air et donc le nombre de spores viables/m³ d'air.

Il est apparu que de l'inoculum viable de *B. cinerea* était présent lors de 81 jours d'échantillonnage, répartis sur toutes les saisons (A15) (Fig. 11). Globalement l'abondance d'inoculum avait tendance à être plus élevée en automne. Cependant les tendances saisonnières étaient différentes pour chacune des 3 années de collecte. De façon assez surprenante, nous avons collecté de l'inoculum aérien viable en été lorsque les températures étaient très élevées (>35°C) et en hiver lorsqu'elles étaient négatives, ce qui représentent des conditions défavorables à la croissance et à la sporulation du champignon. Cela a soulevé la question de l'origine de cet inoculum présent dans l'air et cela a conduit à d'autres projets et analyses qui seront traités dans le chapitre consacré à la dissémination aérienne à différentes échelles.

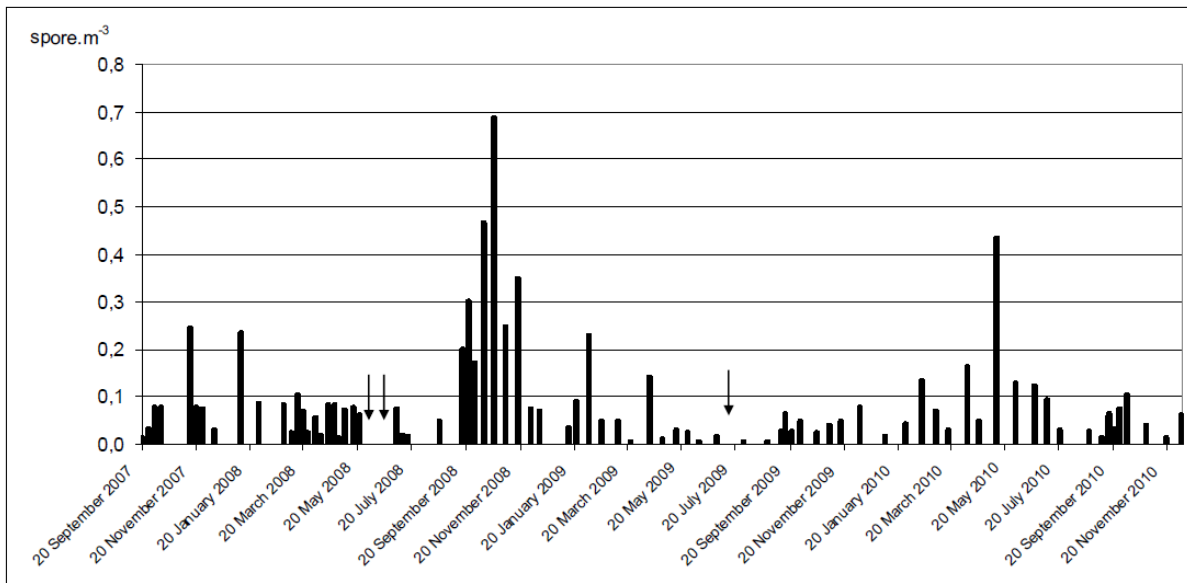


Figure 11 : Concentration quotidienne d'inoculum viable de *B. cinerea* au cours de la période d'échantillonnage (septembre 2007 à décembre 2010), soit 84 jours d'échantillonnage. Les jours d'échantillonnage sans inoculum viable en suspension dans l'air sont marqués d'une flèche (19 et 26 juin 2008, 16 juillet 2009)

Pour aborder le volet de l'inoculum tellurique, j'ai choisi d'évaluer l'abondance de l'inoculum viable de *B. cinerea* présent dans le sol et de déterminer si celui-ci correspondait au mycélium trouvé sur les symptômes sur plantes. Dans le cadre du projet SYSBIOTEL (stage master M. Bordier, A. Pinault), nous avons quantifié l'inoculum de *B. cinerea* dans le sol de deux serres abritant des cultures de laitue successives (4 dans chaque tunnel, avril 2009-avril 2010). Des échantillons de sol ont ainsi été prélevés avant et après chaque culture de laitue, observés pour la présence éventuelle de sclérotes, tamisés, puis mis en suspension (1g dans 10 ml d'eau) et étalés sur milieu semi-sélectif (BSTM) pour révéler la présence d'inoculum invisible à l'œil nu. Le nombre d'UFC par gramme de sol en a été déduit. Les souches de *B. cinerea* obtenues à partir de sol ont été génotypées avec les 9 marqueurs microsatellites précédemment cités et ont été comparées avec les souches collectées sur les laitues lors des récoltes. Enfin l'incidence de la pourriture grise a été enregistrée lors de chaque récolte.

Les résultats ont montré qu'aucun sclérote n'a été observé dans les échantillons de sol analysés. Le nombre d'UFC par gramme de sol se situaient entre 0 et 1177 (A10). Les échantillons de sol ayant été tamisés pour être mis en suspension et pipetés, aucun débris végétal visible à l'œil n'a non plus été observé. Cela soulève la question de la nature de l'inoculum tellurique de *B. cinerea*. Une hypothèse sur la présence de débris microscopiques abritant du mycélium et une hypothèse sur la présence de conidies dans le sol peuvent être émises (Moyano & Melgarejo 2002). Cette étude a également montré l'absence de corrélation significative entre l'abondance de l'inoculum dans le sol et l'incidence de la maladie sur la laitue ($P = 0,11$). Cette absence de corrélation pourrait

être due à l'impact de l'inoculum aérien de *B. cinerea* sur l'épidémie de pourriture grise, mais l'abondance d'inoculum aérien n'a pas été évaluée dans cette étude.

Soixante-cinq souches provenant de plantes malades ont été comparées à 66 souches provenant du sol sur la base de leur profil haplotypique. Il est apparu que 7 haplotypes étaient partagés par des souches collectées sur laitues et des souches isolées du sol (A10). De plus le niveau de différenciation génétique entre les souches de laitue et les souches du sol a diminué sur trois cultures successives de laitues. Dans le même temps, la structure génétique des deux groupes de souches a eu tendance à devenir similaire. Ces résultats sont cohérents avec l'hypothèse d'un flux d'inoculum entre la culture de laitue et le sol, et inversement.

2-2 Inoculum tellurique vs inoculum aérien: cas de *S. sclerotiorum*

Dans le cadre du projet SCLEROLEG nous avons quantifié l'inoculum aérien viable de *S. sclerotiorum* avec la même méthodologie que pour *B. cinerea*. Dans cette étude les échantillonneurs d'air étaient positionnés dans un champ d'endive dans la région d'Arras (Pas de Calais). Nous avons procédé à 100 échantillonnages d'air répartis sur 3 années (juillet 2014-octobre 2016) avec un « portable air sampler » (Burkard) ayant un débit de 20L.min⁻¹. Les particules aériennes étaient collectées sur un milieu permettant de distinguer les colonies de *S. sclerotiorum* des autres colonies fongiques (Steadman et al. 1994).

Les résultats ont montré la présence d'inoculum viable pendant 80 jours sur 100, même quand les endives n'étaient pas encore implantées dans le champ (A1). L'abondance d'inoculum n'était pas liée aux saisons. L'absence d'apothécies visibles dans le champ d'endives soulève la question de l'origine de l'inoculum aérien qui est censé être composé d'ascospores. Les apothécies étaient-elles localisées dans les champs voisins ou dans les zones non cultivées (bord de champ, jachères ?), avaient-elles une origine plus lointaine ?

Dans le projet SCLEROLEG nous avons également collecté des souches des compartiments sol/air/plante dans des parcelles de cultures de carotte lors de deux saisons (2014/2015-2015/2016) en Gironde. Les souches ont été collectées dans le sol, l'air, et sur les carottes symptomatiques (carottes vivantes sur pied et carottes enfouies en conservation dans le sol sableux). Elles ont été génotypées avec les 16 marqueurs microsatellites précédemment cités. J'ai ainsi comparé les profils haplotypiques des souches provenant des 3 compartiments (résultats non publiés, article en cours de rédaction). Étonnamment, aucun sclérote n'a été extrait du sol du champ de la saison 1 (juillet 2014- mars 2015). Cependant, de la pourriture blanche était présente sur les carottes, pendant la saison de culture et pendant la période de stockage. 73% des souches de *S. sclerotiorum* collectées sur des carottes debout et 80% sur carottes enfouies avaient un haplotype similaire à celui des souches collectées dans l'air (Fig. 12). Lors de la saison 2 (juillet 2015-mars 2016) des sclérotés ont été collectés dans le sol. 30% des souches collectées sur

carotte (sur pied et enfouies) avaient un haplotype similaire à celui des souches aériennes, 26 % avaient un haplotype similaire à celui des souches telluriques.

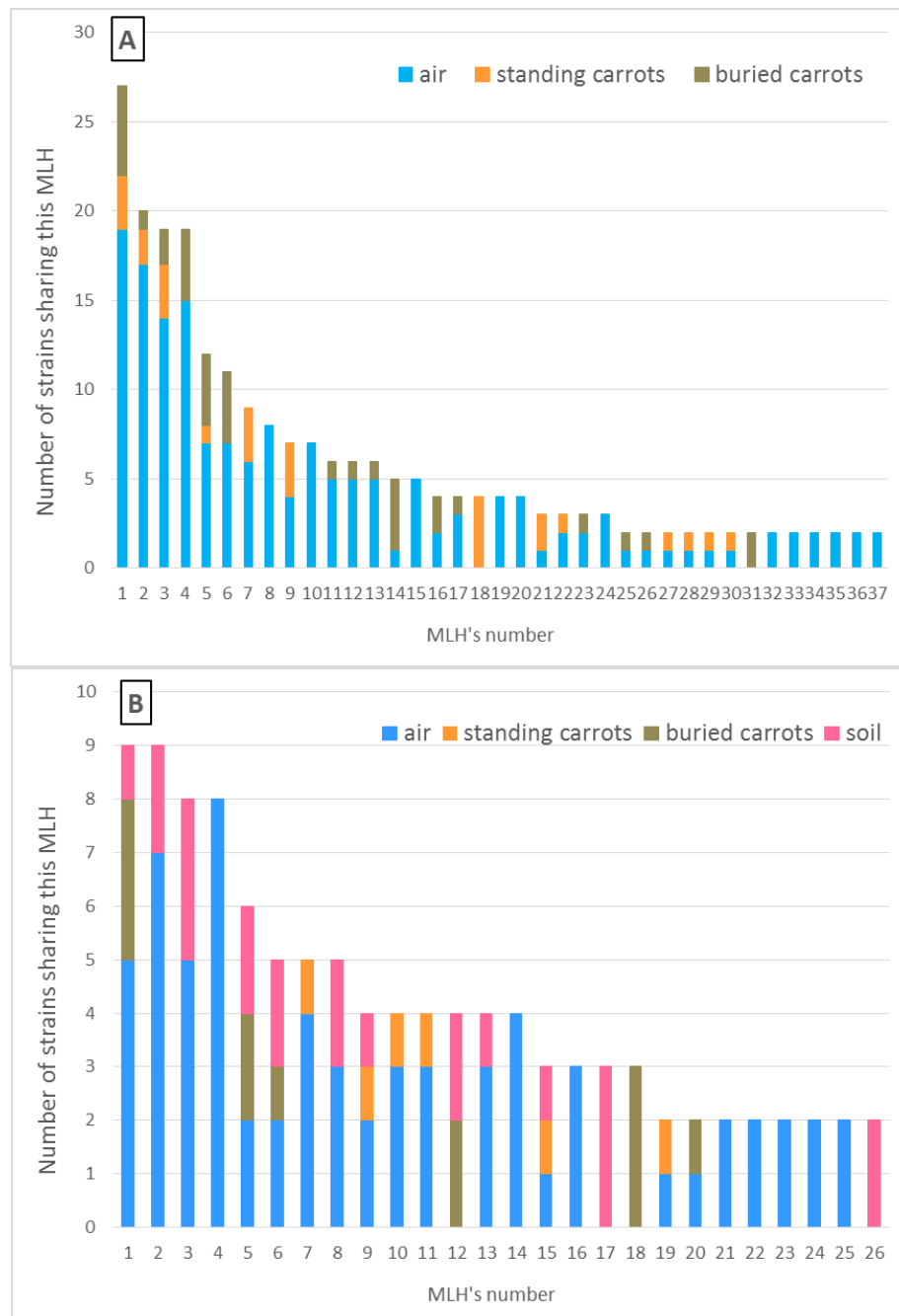


Figure 12: Répartition des souches de *S. sclerotiorum* en fonction de leur origine parmi les haplotypes partagés par plusieurs souches au cours de la saison 1 (A) et de la saison 2 (B).

Ces résultats montrent que l'inoculum tellurique, mais aussi l'inoculum aérien, de *S. sclerotiorum* engendrent les symptômes de pourriture blanche sur les cultures. Par conséquent, les modèles de prévision des risques épidémiques ainsi que les stratégies de protection des plantes ne peuvent ignorer l'un ou l'autre de ces types d'inoculum.

3-INOCULUM DANS LES HABITATS NON AGRICOLES

B. cinerea est très polyphage : il attaque de très nombreuses espèces cultivées mais aussi des plantes sauvages. Il peut également vivre sous forme saprophyte, sur des débris végétaux et donc potentiellement en dehors du contexte agricole. Afin d'évaluer la capacité de *B. cinerea* à vivre en dehors des réservoirs agricoles, 235 échantillons de divers substrats, notamment des précipitations, du manteau neigeux, de l'eau de rivière et de lac, des biofilms épilithes dans les ruisseaux de montagne, de la litière de feuilles et des débris végétaux, des surfaces rocheuses, des plumes d'oiseau et des plantes sauvages saines de l'extérieur des champs agricoles ont été analysés pour révéler la présence de *B. cinerea* (projet porté par M. Bardin et C. Morris) (A6). Les souches isolées ont été phénotypées. Je me suis chargée de leur caractérisation génétique et je les ai comparé avec des souches issues de plantes cultivées que j'avais également génotypées (Tableau 2).

Tableau 2: Indices de diversité génétique de souches de *B. cinerea* collectées dans des environnements non agricoles et sur des cultures.

	Number of <i>B. cinerea</i> isolates	Gene diversity (Hnb)	Mean number of alleles per locus	Number of distinct MLH	Haplotypic diversity
Total non-agricultural habitats	100	0.77 (0.16)	13.6	83	0.82
Precipitation	63	0.78 (0.14)	12.3	54	0.85
Snowpack	7	0.69 (0.18)	4	6	0.83
Fresh water	12	0.64 (0.29)	4.5	9	0.75
Epilithic biofilm	2	0.44 (0.33)	1.6	2	1
Litter	3	0.62 (0.26)	2.4	3	1
Plant debris	1	0	1.0	1	nd
Wild plants	7	0.57 (0.27)	3.3	7	1
Bird feather	5	0.38 (0.27)	2.1	5	1
Crops	321	0.76 (0.18)	15.6	186	0.58

Tous les substrats, à l'exception des surfaces rocheuses, abritaient *B. cinerea*. Un arbre phylogénétique construit avec 100 souches « non agricoles » et 321 souches de plantes cultivées a révélé que ces deux groupes de souches ne pouvaient pas être distingués (Figure 13). De plus, les deux groupes de souches présentaient des niveaux de diversité génétique ainsi que des niveaux d'agressivité (après inoculation sur tomate) équivalents (A6) (Tableau 2).

Ces résultats montrent que *B. cinerea* peut vivre dans des réservoirs environnementaux, en l'absence d'hôtes sensibles, et que ces réservoirs sont de potentielles sources d'inoculum.

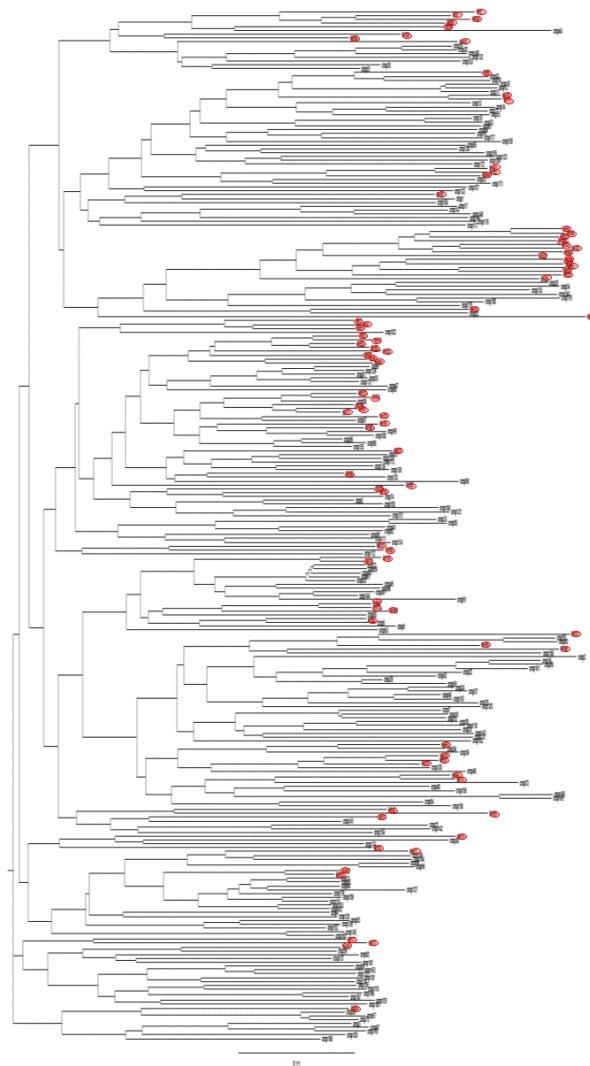


Figure 13 : Arbre phylogénétique montrant la distance génétique entre les souches issues d'habitats non-agricoles (rouge) et de cultures.

4- CONCLUSION ET PERSPECTIVES

4-1 L'étude des champignons endophytes à l'heure actuelle

Au début de ma carrière, l'étude des champignons endophytes n'étaient pas du tout en vogue. L'INRA avait même demandé à certaines équipes travaillant sur le sujet de changer de thématique (ex, collègues de Clermont Ferrand). J'avais du mal à construire des projets en collaboration car j'étais quelque peu isolée sur ce thème. A l'heure actuelle c'est un sujet de recherche qui est en plein boom. En effet le microbiote est de plus en plus pris en compte dans la santé des plantes, notamment le microbiote endophyte. Les champignons colonisant les tissus végétaux sans provoquer de symptômes présentent un potentiel intéressant comme agents de bio-contrôle. En effectuant la recherche « endophyte+fungus+grasses » sur Web of Science, on trouve environ 20 articles publiés par an pendant la période où j'ai travaillé sur le sujet (1998-2005) et le double à l'heure actuelle. L'engouement pour les champignons endophytes s'est étendu à des plantes autres que les graminées. Ainsi, la recherche « endophyte+fungus+plant » donne 82 articles en 2005 contre 364 en 2018.

Récemment, des articles ont montré que *B. cinerea*, jusque-là considéré comme un exemple de champignon nécrotrophe, pouvait se trouver sous forme endophyte (sans expression de symptôme) dans les tissus végétaux de plusieurs familles botaniques, notamment chez les espèces de la famille des Astéracées, dont fait partie la laitue. L'apparition des symptômes à partir d'une forme endophyte semble avoir lieu lorsque les tissus sont stressés ou sénescents (Sowley et al. 2010 ; Shaw et al. 2016). L'état physiologique de *B. cinerea* diffère entre l'infection asymptomatique et l'infection produisant des nécroses (Emmanuel et al. 2018). Ainsi que je me suis penchée sur la phase endophyte de *B. cinerea*. J'ai analysé des lots de semences d'espèces potagères et notamment de laitue (5 lots) mais la présence de *B. cinerea* n'a été détectée que dans une seule graine d'un lot de laitue. En revanche, en suivant le protocole de Sowley et al. (2010) j'ai réussi à inoculer des laitues avec une souche de *B. cinerea* très agressive (Bc1) sans apparition de symptôme. Quatre semaines après inoculation avec des conidies, à sec, 87% des laitues analysées ont révélé la présence de *B. cinerea* dans les tissus racinaires alors qu'elles ne présentaient aucun symptôme de pourriture grise.

Cette phase latente endophyte remet en question la vision globale de l'épidémiologie de la pourriture grise. Approfondir les études concernant cette phase de *B. cinerea* me semble intéressant car si la présence endophyte de *B. cinerea*, non négligeable dans certaines espèces est confirmée, et que le changement de phase endophyte vers la phase pathogène peut être induit par l'âge des plantes et où les conditions climatiques, cela laisse entrevoir des pistes pour limiter l'apparition de la maladie (récolter les plantes plus jeunes, gérer différemment le climat dans les abris.....).

4-2 Méta-analyses génétiques pour identifier les potentielles sources d'inoculum

Comme nous l'avons vu dans cette partie, comparer des souches de *B. cinerea* et *S. sclerotiorum* issues de différents compartiments sur la base de leur profil génétique permet d'identifier des compartiments qui échangent de l'inoculum. Ces données sont extrêmement utiles pour évaluer la dissémination à différentes échelles des agents pathogènes (Cf partie suivante).

Je dispose à l'heure actuelle d'environ 700 souches de *B. cinerea* et 700 souches de *S. sclerotiorum* avec des profils haplotypiques. J'aimerais pouvoir comparer ces profils avec des collègues français et européens qui possèdent des souches avec des haplotypes basés sur les mêmes microsatellites. Cela permettrait de déterminer les ressemblances génétiques entre groupes de souches issues de différentes régions/pays. De telles données sont une première indication de potentiel échanges d'inoculum entre ces régions et pour comprendre comment se structurent les populations de ces champignons pathogènes à l'échelle globale. Plusieurs équipes en Europe ont publié sur des jeux de données basés sur les mêmes marqueurs microsatellites que j'ai utilisés sur *B. cinerea* et sur *S. sclerotiorum*.

En ce qui concerne *S. sclerotiorum* j'aimerais comparer mes souches avec celles de John Clarkson (University Warwick) et celles de collègues norvégiens (Guro Brodal et Berit Nordskog, Norwegian Institute of Bioeconomy Research). Ensemble ils ont publié un article sur la structuration génétique des populations de *S. sclerotiorum* en Europe du nord basée sur 800 souches (Clarkson et al. 2017). J'ai déjà eu quelques échanges avec J. Clarkson et il m'a envoyé quelques souches, notamment une qui porte un des haplotypes le plus fréquent de sa collection. J'ai génotypé cette souche. Sur la base des 8 microsatellites qu'il utilise (et que j'utilise également, en plus des 8 autres), j'ai constaté que nous avons la même grille de lecture. J'ai aussi constaté que sur ces 8 loci, j'ai des haplotypes identiques parmi les souches de ma collection. J'attendais d'avoir des publications acceptées sur *S. sclerotiorum* avant de proposer une collaboration aux collègues britanniques et norvégiens. C'est chose faite, maintenant il me faut trouver un cadre et des objectifs communs pour solliciter une collaboration.

En ce qui concerne *B. cinerea*, au niveau national j'aimerais que l'on puisse réaliser une méta-analyse des souches qui sont en collection et qui ont été génotypées dans différentes unités INRA. L'unité BIOGER (Grignon) notamment possède plusieurs centaines de souches génotypées collectées sur plantes cultivées et sauvages. Les mêmes microsatellites ont été utilisés mais lus sur des appareils différents. Ainsi, techniquement cela demande de trouver une grille de lecture commune sur les jeux de données car la taille des microsatellites telle qu'elle est lue n'est pas forcément identique entre deux équipes lorsqu'on change d'appareil et de logiciel. Ceci peut être assez facilement réalisé sans avoir à relancer des analyses chronophages et couteuses. Du point de vue des collaborations cela nécessite de trouver une entente sur la mise en commun des données et sur la stratégie de valorisation des résultats (auteur des publications par exemple).

Au-delà de ces écueils, cela permettrait de comparer les souches présentes dans différents pays et de réaliser les analyses de génétique des populations et d'épidémiologie moléculaire à une échelle globale. On pourrait ensuite confronter ces données avec les mouvements de masses d'air afin d'évaluer la potentielle dissémination de souches d'un pays à l'autre, c'est ce que nous allons voir, entre autres, dans la partie suivante.

EVALUER LA DISSEMINATION AERIENNE DE L'ECHELLE LOCALE A L'ECHELLE GLOBALE

Contrairement à la dissémination des agents pathogènes engendrée par les activités humaines, la dissémination aérienne est difficilement contrôlable car les masses d'air ne connaissent pas de frontière. A défaut de pouvoir stopper les mouvements d'agents pathogènes dans l'atmosphère, on peut essayer de comprendre les chemins qu'ils empruntent afin de les anticiper et de prévoir les risques épidémiques dans des zones données. Pour prévoir l'arrivée de spores dans des zones où des cultures sensibles sont cultivées, il faut identifier les sources de spores, locales et distantes, et modéliser les trajectoires des masses d'air (Isard et al. 2005 ; Tao et al. 2009). Les outils prédictifs peuvent aider les producteurs à rationaliser leurs pratiques, en particulier la lutte chimique, et peuvent ainsi conduire à une réduction du nombre d'applications de fongicides. L'étude des voies atmosphériques fréquemment empruntées par les agents pathogènes peut également être un moyen d'organiser les cultures au niveau du paysage, par exemple pour réduire la présence de variétés sensibles identiques dans les zones situées sur le trajet de dispersion d'un agent pathogène menaçant (Singh et al. 2015; Meyer et al. 2017).

Pour les champignons parasites obligatoires, tels que la rouille ou certains oomycètes, qui ont une gamme d'hôtes réduite, et dont les zones sources et puits peuvent être facilement identifiées, la prévision des risques est relativement facile (Isard et al., 2005; Tao et al., 2009). En revanche pour les champignons polyphages et capables de vie saprophyte tels que *B. cinerea* et *S. sclerotiorum*, prévoir l'arrivée de spores est particulièrement difficile, car les sources d'inoculum ne peuvent pas être facilement identifiées.

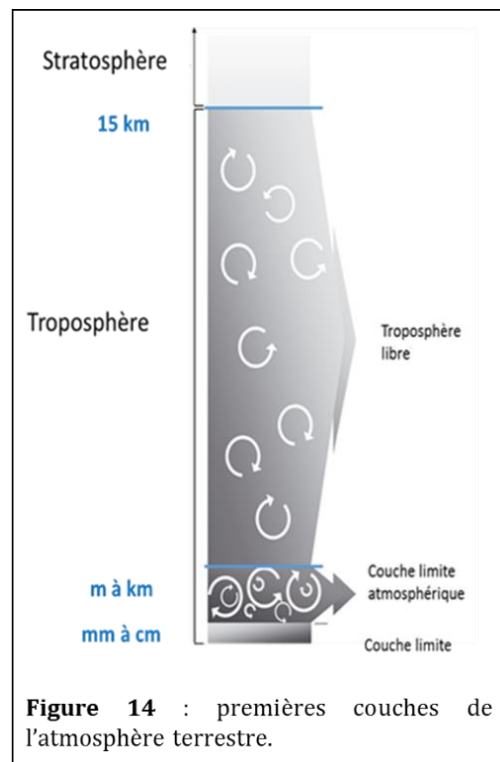
De plus, l'étude de la dissémination aérienne de particules invisibles à l'œil nu se heurte à certains verrous technologiques. Il est impossible d'observer en temps réel la progression d'un nuage de microorganismes dans l'atmosphère, même avec des jumelles. Ainsi l'étude du cheminement des microorganismes dans l'air se fait par des moyens indirects : observation du développement d'une maladie dans une zone distante de la zone source, comparaison des profils génétiques des individus à la source et au puits, capture de particules en suspension dans l'air à l'aide de matériel spécialisé, utilisation de modèle de trajectoires de masses d'air par exemple. J'ai commencé à travailler sur l'aérobiologie en 2005 à mon arrivée dans l'unité de Pathologie Végétale d'Avignon. Depuis, dans mes projets de recherche, j'ai utilisé ces différents outils pour étudier la dissémination aérienne de *B. cinerea* et *S. sclerotiorum* avec pour objectif à terme de développer un outil de prévision des risques épidémiques.

1-MESURE DES FLUX DE MICROORGANISMES AU-DESSUS D'UN COUVERT VEGETAL

Projets : SPE Flux (2009), Microflux (2010-2012)

Collaborations principales : UR Pathologie Végétale (C. Morris), UMR EPHYSE (Y. Brunet, J.M. Bonnefond), UMR EMMAH (D. Courault, O. Marloie), CNRS (Pierre Amato), F. Carotenuto (CBR IBIMET)

Etre capable de mesurer des flux au-dessus de diverses surfaces pourrait permettre de déterminer quand et dans quelles conditions elles se comportent comme une source ou un puits de microorganismes. Comprendre la relation entre les flux et les paramètres climatiques pourrait fournir des informations pour paramétrer des modèles de dispersion méso-échelle (10 mètres à plusieurs kilomètres) et, par la suite, des modèles de dispersion à longue distance (10 à plusieurs milliers de kilomètres) (A32). En effet, pour voyager à plus ou moins longue distance, les microorganismes doivent échapper à la couche limite et atteindre la troposphère libre (Fig. 14). En 2005, lorsque j'ai commencé à travailler sur le sujet des flux de microorganismes, seules deux publications fournissaient des données sur les mesures directes du flux de bactéries près de la surface (Lindemann et al. 1982; Lighthart & Shaffer 1994). La plupart des articles traitant des micro-organismes dans l'atmosphère



produisaient des données sur les concentrations (UFC/m³) en considérant les types et les groupes taxonomiques et les variations spatio-temporelles de leur abondance. Les concentrations de microorganismes en suspension dans l'air sont généralement très variables, même sur de petites échelles de temps. En effet la concentration mesurée dans une atmosphère extérieure est le résultat d'un équilibre dynamique entre les flux d'entrée et de sortie des micro-organismes dans l'atmosphère.

Dans le domaine des polluants atmosphériques, afin de caractériser les sources d'émission, les chercheurs disposent de méthodes et d'outils permettant de mesurer non seulement les concentrations, mais également les flux. De nombreuses techniques permettant d'estimer les flux d'échanges surface/atmosphère de divers polluants (composés organiques volatils, CO₂) sont décrites dans la littérature. La plupart d'entre-elles nécessitent des mesures à haute fréquence (de l'ordre de 5 à 20 Hz: 5 à 20 mesures par seconde) de paramètres micro-météorologiques et de concentrations de gaz (Langford et al. 2009). Dans le domaine microbiologique, il est impossible

actuellement de mesurer à haute fréquence les concentrations de particules biologiques. En effet, les valeurs de concentration sont déduites du débit de l'échantillonneur d'air, de la durée de l'échantillonnage et de la quantification des particules de bioaérosol dans le volume d'air échantillonné. Cette quantification peut être réalisée par des observations microscopiques, des méthodes de culture ou une quantification de l'ADN mais aucune de ces méthodes ne donne de résultats immédiats. En conséquence, la plupart des articles contenant des données sur les émissions et les flux de spores fongiques et de bactéries étaient basés sur des approximations et des hypothèses.

Ainsi, dans un premier temps, avec des collègues du département EA (Environnement et Agronomie) j'ai mis en place le dispositif décrit par Lighthart & Shaffer (1994) pour mesurer des flux de bactéries au-dessus de couverts végétaux (A27)(Fig. 15). Les flux étaient calculés avec la formule suivante :

$$k_i = \Delta[\text{bact}] \times W'T' / \Delta T$$

dans laquelle k_i est le flux de bactéries ($\text{UFC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), $\Delta[\text{bact}]$ la différence de concentrations en bactéries ($\text{UFC} \cdot \text{m}^{-3}$) entre 0.5 m and 2.5 m au-dessus du sol, ΔT la différence de température entre 0.5 m and 2.5 m et $W'T'$ le flux de chaleur sensible ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Les données de flux fournies par cette méthode sont un flux net résultant de particules ascendantes et descendantes. Cette méthode ne permet pas de quantifier la valeur absolue de microorganismes émis par une surface. Elle permet de déterminer si globalement la surface se comporte comme une source ou un puits. Si les valeurs de flux sont positives, cela signifie que la surface émet plus de microorganismes qu'elle n'en reçoit au moment de la mesure. Lorsque les valeurs de flux sont négatives, cela signifie que la surface reçoit plus de micro-organismes qu'elle n'en émet.



Figure 15 : dispositif de mesure des flux : échafaudage de 2 mètres de haut avec des appareils pour mesurer des températures, la vitesse du vent, le flux de chaleur sensible, et capturer les bactéries en suspension dans l'air.

Les expérimentations étaient très lourdes à mettre en place et à faire tourner. Ainsi nous ne pouvions pas récolter beaucoup de données. Les valeurs de flux enregistrées étant très variables et avec le peu de données il était difficile de mettre en évidence des corrélations avec les paramètres climatiques. Cependant, globalement les flux nets étaient descendants la nuit et ascendants par temps ensoleillé lorsque le sol se réchauffe, entraînant des turbulences ascendantes d'air (Fig. 16).

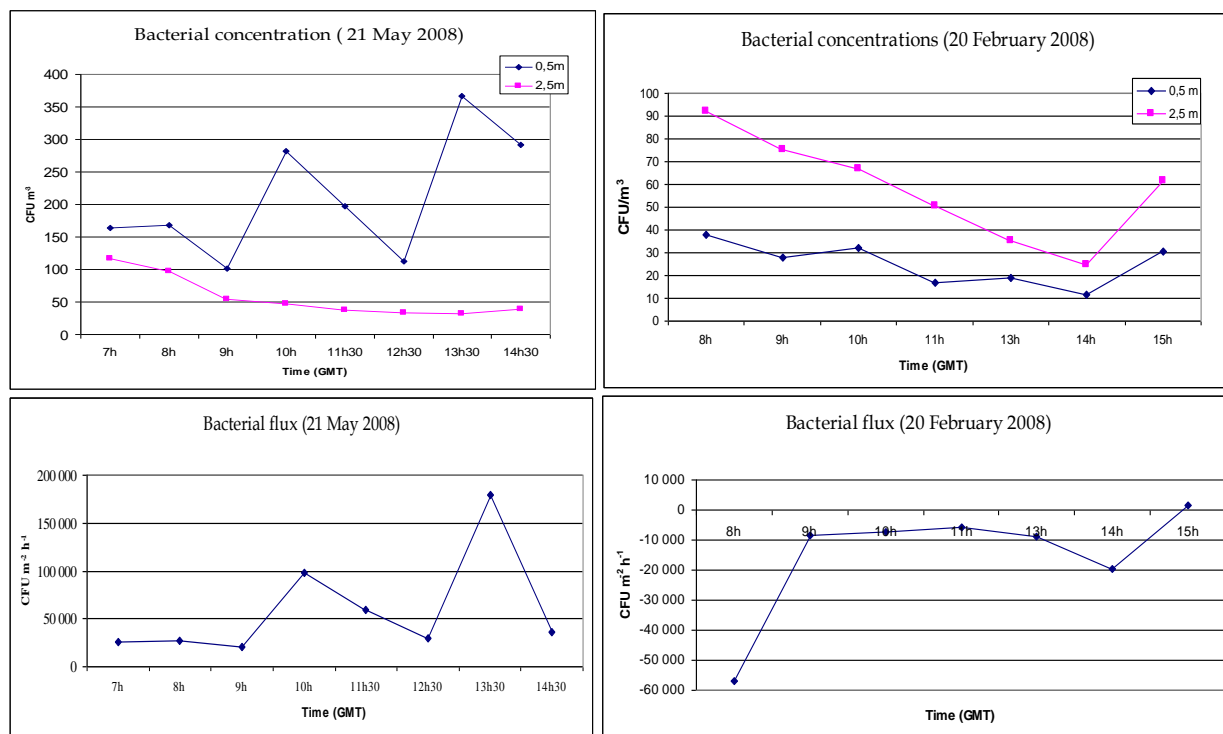


Figure 16 : exemples de flux net de bactéries positif (21 mai 2008) et négatif (20 février 2008) avec leurs concentrations aériennes associées (cadres du haut).

En 2010, dans le cadre du projet Microflux, en collaboration avec des collègues physiciens, nous avons comparé nos données de flux avec celles obtenus avec la méthode REA (Relaxed-Eddy Accumulation). Elle consiste à mesurer une différence de concentration moyenne entre deux échantillons d'air prélevés pendant des périodes où la vitesse verticale de l'air est soit positive (mouvement ascendant), soit négative (descendant). Cela permet de s'affranchir des turbulences. Cependant cela ne s'est pas révélé être la méthode idéale. Nous avons encore buté sur des problèmes liés notamment à l'analyse des échantillons d'air *in situ* et à la quantification des bactéries dans l'air. Au final, les données de flux issues des premières campagnes de mesure ont été complétées et valorisées par F. Carotenuto (2018) (A8) qui a développé un prototype de modèle pour estimer les émissions de microorganismes sur la base de quelques paramètres météorologiques. Ce modèle doit être affiné, mais c'est un début pour lever le verrou

technologique que représente l'évaluation des flux de microorganismes au-dessus de surfaces. A l'heure actuelle il y a deux pistes pour avancer dans cette évaluation des flux de microorganismes :

- soit un appareil permettant de mesurer la quantité de microorganismes à la même fréquence que les paramètres climatiques. Pour l'instant cela me semble peu probable vu le temps que prend une PCR quantitative par exemple. Je suppose qu'il faudra attendre encore quelques années pour avoir des mesures de l'ordre de quelques dizaines de Hz même si la technologie avance à grand pas.

- soit un modèle plus avancé permettant d'évaluer finement les flux à partir de données météorologiques et peut être aussi à partir de données concernant les caractéristiques du couvert végétal.

2-FLUX D'INOCULUM ENTRE STRUCTURES SEMI-FERMEES (TUNNELS DE CULTURE)

Projets : ADD ECOSERRE (2005-2008), Thèse A. Adjebli (Université de Bejaia)

Collaborations principales : UR Pathologie Végétale (M. Bardin, P. Nicot), UMR ISA (H. Fatnassi, T. Boulard)

Dans les régions de cultures horticoles, on rencontre souvent des serres en verre et des tunnels plastiques qui permettent de décaler ou de prolonger les saisons de culture pour certaines espèces maraichères ou ornementales. Dans ces abris les conditions climatiques (température moyenne, humidité...) sont favorables aux cultures mais également aux champignons pathogènes auxquels elles sont sensibles. Les exploitations agricoles de la région Paca comprennent souvent plusieurs serres ou tunnels côte à côte. Grace à des données physiques et génétiques nous avons évalué les échanges d'inoculum aérien entre tunnels.

2-1 Modélisation physique des flux de spores

Dans le projet ECOSERRE nous nous sommes demandés si l'inoculum produit dans un tunnel pouvait impacter les plantes présentes dans un tunnel voisin. Prenons le cas de *B. cinerea*, qui peut attaquer plusieurs espèces présentes simultanément dans des tunnels adjacents (ex laitue/tomate) : connaître les flux potentiels de spores entre tunnels peut permettre de mieux raisonner la gestion des ouvrants mais aussi l'application de produits fongicides. L'objectif est d'éviter qu'un foyer de pourriture grise qui se développe dans un tunnel ne contamine toutes les structures adjacentes.

Ainsi nous avons modélisé les échanges de spores d'un tunnel à l'autre dans un dispositif typique de la région Paca (stage master K. Zeeshan). Les tunnels mesuraient 8x16m et étaient séparés de

leur voisin de 4 m. Tous les tunnels étaient parallèles et alignés dans le sens du vent dominant (nord-sud). Nous avons utilisé un modèle déjà éprouvé dans des serres en verre multi-chapelles (Boulard et al. 2008) reposant sur la formule suivante :

$$P_i \Delta t = [V_s \Delta C_i + D_i \Delta t] - [G(C_o - C_i) \Delta t]$$

dans laquelle C_i et C_o sont les concentrations en spores aériennes internes et externes, G représente le taux de renouvellement d'air dans une serre c'est-à-dire les transferts possibles entre l'extérieur et l'intérieur de la serre, D_i est la déposition de spores et P_i est la production interne de spores (Fig. 17).

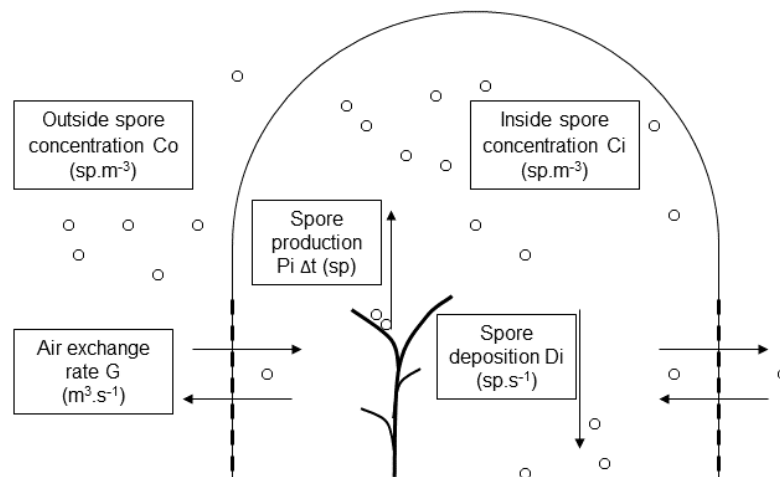


Figure 17 : bilan des quantités de spores produites, déposées et échangées entre l'intérieur et l'extérieur.

Les résultats montrent que lorsque des plantes malades (avec des lésions sporulantes) étaient présentes dans le tunnel, la production de spores sur 24 h, estimée par le modèle, équivalait à 5 à 10% de la quantité potentielle maximale présente sur les plantes, ce qui était cohérent avec la quantité de spores susceptible d'être libérée par l'action du vent sur les lésions sporulantes (A17). Dans ce cas, l'échange de spores était dirigé vers l'extérieur. Lorsque le tunnel était vide ou contenait des plantes exemptes de maladie, moins de spores étaient échangées et le mouvement des spores était globalement de l'extérieur vers l'intérieur du tunnel.

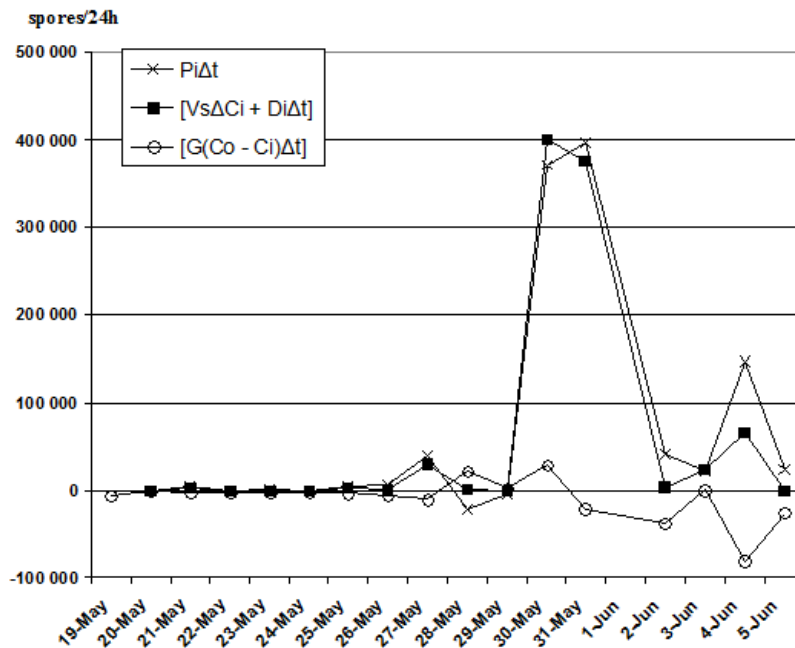


Figure 18 : Variation des termes du bilan de spores : production des spores ($P_i \Delta t$), variation de la concentration interne et du dépôt de spores ($V_s \Delta C_i + D_i \Delta t$), et échanges avec l'extérieur ($G(C_o - C_i) \Delta t$). Le 23 mai un premier lot de 15 plantes malades a été introduit dans le tunnel. Il a été remplacé par un second de 30 plantes le 29 mai.

2-2 Données génétiques

Sur le même dispositif expérimental ECOSERRE, toujours pour tester l'hypothèse d'un échange d'inoculum entre tunnels, nous avons caractérisé 170 souches de *B. cinerea* collectées sur les laitues lors des récoltes, dans les deux tunnels extérieurs (séparés par les 4 autres tunnels, ce qui équivaut à une distance entre les deux tunnels de 52 m) (A12).

Les deux types sexuels connus de *B. cinerea* ont été observés dans les tunnels. La diversité génétique des souches de *B. cinerea* était similaire dans les deux tunnels. Le degré de différenciation génétique entre les souches collectées dans les 2 tunnels n'était pas significatif même si seulement 2.3% des souches avaient des haplotypes identiques entre tunnels. Cela peut s'expliquer par le fait que les ouvrants latéraux étaient orientés parallèlement au vent dominant, afin d'empêcher le vent de s'engouffrer dans les structures et de les détériorer. Cela a peut être limité les échanges d'air entre les deux tunnels.

Ces résultats, sont cohérents avec ceux d'une étude menée dans 4 tunnels localisés en Algérie, éloignés au maximum de 20 km les uns des autres et contenant des cultures de tomate (thèse A. Adjebli). Des souches de *B. cinerea* avec des haplotypes identiques ont été identifiées dans ces tunnels au cours d'une année donnée (A14) et le degré de différenciation génétique n'était pas

significatif. La direction dominante des vents au cours de l'étude ainsi que les données génétiques tendaient à montrer un échange d'inoculum des serres les plus à l'est vers les serres les plus à l'ouest.

Globalement, les résultats de ces études montrent que l'air est un vecteur d'inoculum entre structures semi-fermées, plus ou moins proches. Ils semblent également indiquer que l'orientation des tunnels en fonction des vents dominants peut impacter les échanges d'inoculum entre tunnels.

3-DISSEMINATION D'INOCULUM A GRANDE ECHELLE

Projets : SPE Aérobiologie (2010), COPAIRNIC (2014-2016), SCLEROLEG (2012-2017)

Collaborations principales : UR BioSp (S. Soubeyrand, O. Martin, M. Choufany), UR Pathologie Végétale (C. Morris), UMR IAM (F. Halkett)

Les phénomènes de dissémination à longue distance ne peuvent pas être observés en direct. Les preuves sont généralement constituées d'observations qui, mises bout à bout, constituent un faisceau de présomptions permettant de valider une hypothèse, ou au moins de la considérer comme possible. C'est le cas pour les exemples les plus frappants de dispersion sur de longues distances (LDD) et notamment les mouvements intercontinentaux de spores conduisant à l'apparition de rouille dans des zones jusque-là non touchées (Bowden et al. 1971; Purdy et al. 1985; Brown & Hovmoller 2002). C'est en recoupant des observations de symptômes, en comparant les individus dans les zones sources et puits, et en étudiant les événements climatiques ponctuels (cyclones) ou récurrents (déplacements de masses d'air réguliers) que les hypothèses ont été validées. J'ai adopté cette démarche intégrative pour l'étude de la dissémination aérienne de *B. cinerea* et *S. sclerotiorum*.

Globalement, à l'échelle internationale, les articles mentionnant de l'inoculum aérien fongique portent très rarement sur de l'inoculum viable et se limitent à de la quantification de l'inoculum total. Les études d'aérobiologie présentées ci-après sont originales par le fait qu'elles portent exclusivement sur de l'inoculum viable et qu'elles montrent la diversité génétique intra-espèce de l'inoculum aérien. Dans Web of Science si l'on croise les mots clés « airborne inoculum » avec « genetic structure » ou « genetic characteristic » ou « genetic diversity », on obtient seulement une dizaine d'articles.

3-1 Données quantitatives

Comme nous l'avons vu dans un chapitre précédent, l'inoculum viable de *B. cinerea* et *S. sclerotiorum* a été trouvé dans l'air respectivement lors de 96 et 80% des jours de collecte. Pour tester l'hypothèse d'une origine locale de l'inoculum j'ai étudié les corrélations entre l'abondance de l'inoculum aérien à un point donné et les paramètres climatiques locaux. Des corrélations se sont révélées significatives (tableau 3). Ces corrélations positives ou négatives, en plus d'être significatives, ont un sens biologique par rapport aux conditions favorables pour le développement de *B. cinerea* et *S. sclerotiorum* (ces deux champignons ont une croissance mycélienne optimale à une vingtaine de degrés et en conditions humides notamment). Ce résultat semble indiquer qu'au moins une partie de l'inoculum a une origine locale (A1, A15).

	<i>B. cinerea</i>	<i>S. sclerotiorum</i>
Solar radiation	-	
Mean air temperature	-	
Minimum air temperature		+
Mean relative humidity		+
Minimum relative humidity	+	+
Maximum relative humidity		+
Wind speed	+	+

Tableau 3 : corrélations significatives (positives en vert et négatives en rouge) entre abondance d'inoculum et paramètres climatiques locaux (*B. cinerea* à Avignon, *S. sclerotiorum* à Arras).

En revanche, le fait d'avoir trouvé de l'inoculum viable dans l'air en un point donné même lorsqu'il n'y a pas de cultures sensibles à proximité, ou lorsque les conditions sont défavorables à la sporulation, ou le fait que des structures capables d'émettre des ascospores n'aient pas été trouvées, soulève la question d'une origine distante d'une partie de cet inoculum. Je me suis donc intéressée à la trajectoire des masses d'air. Dans le projet portant sur l'inoculum aérien de *B. cinerea* dans la région d'Avignon, j'ai tracé les rétro-trajectoires des masses d'air arrivées dans la région lors des 84 jours de collecte à l'aide du logiciel Hysplit (Stein et al. 2015 ; Rolph et al. 2017). Il est apparu que les masses d'air arrivant du nord et du sud dans la région d'Avignon avaient tendance à amener plus d'inoculum viable que les masses d'air arrivant de l'ouest (A15)(Fig. 19).

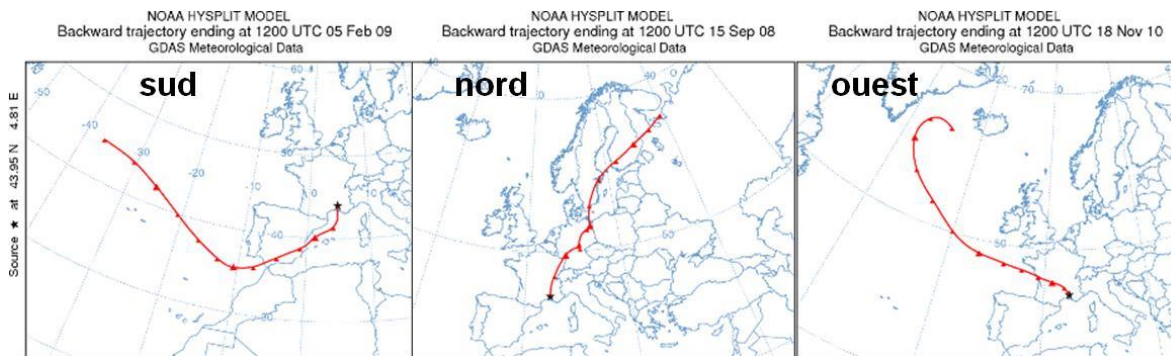


Figure 19: masses d'air caractéristiques arrivant dans la région d'Avignon.

Le modèle linéaire généralisé testé dans le projet COPAIRNIC (O. Martin, BioSp) pour prédire l'abondance d'inoculum a donné le meilleur critère de qualité de la prédiction lorsque non seulement les paramètres climatiques locaux étaient pris en compte mais aussi les paramètres climatiques le long de la trajectoire de la masse d'air (générés par le logiciel Hysplit), ainsi que les interactions entre ces variables. Lorsqu'une variable « origine de la masse d'air » était introduite dans le modèle, la prédiction était encore meilleure. Même si ce modèle n'est pas mécaniste mais statistique, ses sorties sont cohérentes avec les données expérimentales qui tendent à montrer que l'abondance de l'inoculum viable en un point donné n'est pas seulement liée à une origine locale mais aussi à une origine distante.

3-2 Caractéristiques génétiques de l'inoculum aérien

Les caractéristiques génétiques des souches de *B. cinerea* collectées dans l'air d'Avignon complètent de façon cohérente les résultats obtenus sur l'abondance d'inoculum aérien.

Les souches aériennes (616 collectées sur 29 dates réparties sur 3 ans) de *B. cinerea* ont été génotypées avec 9 microsattellites. Une analyse de clustering bayésien sous Geneland (F. Halkett) a montré qu'il existait 8 groupes génétiques distincts. Ces 8 groupes, incluant de 15 à 257 souches, étaient significativement différenciés avec des valeurs de F_{ST} allant de 0.17 à 0.46 (A11). La distribution des souches dans les groupes génétiques variait de manière significative en fonction de l'origine des masses d'air (Fig. 20). Les proportions de souches dans les groupes lorsque les masses d'air provenaient du Nord étaient similaires à celles lorsque des masses d'air provenaient du Sud ($P=0,99$). En revanche, la distribution des souches parmi les groupes était différente si l'on considérait les masses d'air provenant de l'Ouest ($P= 0,001$ et $P= 0,002$ en comparaison avec le Nord et le Sud, respectivement).

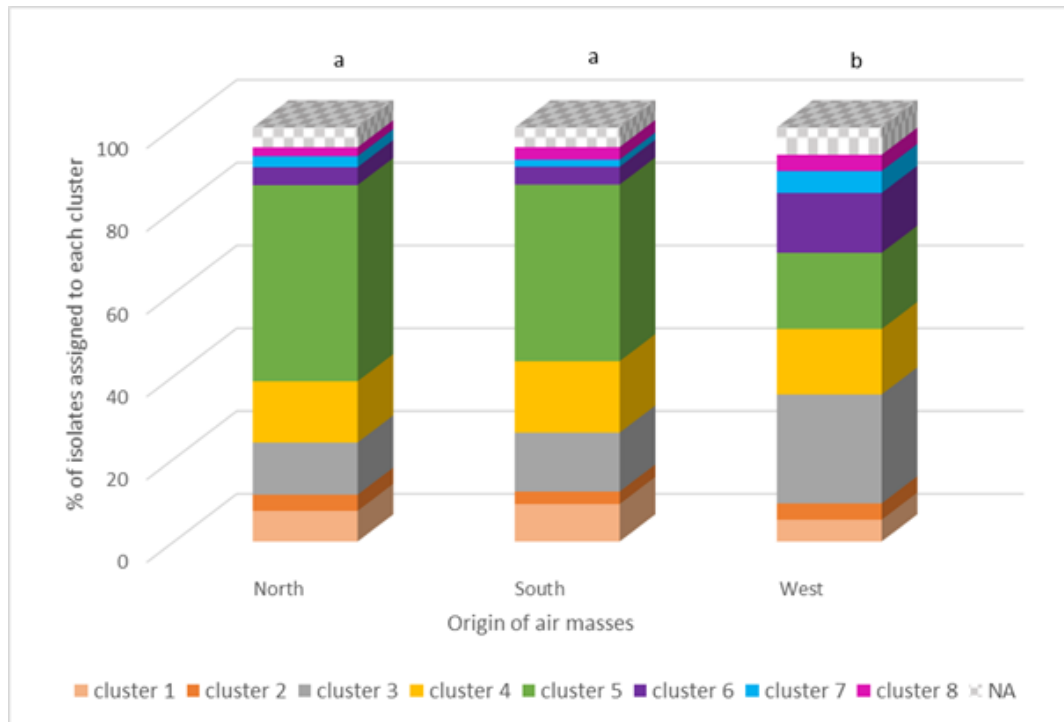


Figure 20 : proportions de souches de *B. cinerea* dans chaque cluster génétique en fonction de l'origine des masses d'air ayant partiellement amené les souches sur le site de collecte.

Pour expliquer la particularité des données liées aux masses d'air provenant de l'ouest, nous pouvons faire l'hypothèse d'une charge différentielle des masses d'air selon les zones qu'elles survolent. En effet, les masses d'air arrivant de l'ouest passent plus de temps au-dessus de l'océan Atlantique et moins de temps au-dessus du continent (où il existe potentiellement plus de sources de *B. cinerea* qu'au-dessus de l'océan). Nous pouvons également émettre l'hypothèse que les masses d'air venant de l'ouest pourraient avoir des caractéristiques différentes des masses d'air méridionales et septentrionales, influençant ainsi le contenu microbien et sa viabilité. Cette observation est en accord avec les résultats de Celle-Jeanton et al. (2009) montrant que les masses d'air arrivant à Avignon en provenance de l'ouest, du nord et du sud diffèrent par leur composition en composants terrestres, marins et anthropiques. De plus, Amato et al. (2007) ont signalé une influence de la chimie des nuages sur le contenu microbien et sa viabilité dans des échantillons prélevés sur le Puy-de-Dôme. En effet, des concentrations croissantes de bactéries et de champignons ont été observées avec des taux croissants de sodium dans les masses d'air. Dans le cadre du projet COPAIRNIC j'ai donc testé une 30^{aine} de souches de *B. cinerea* amenées par des masses d'air provenant du nord, du sud et de l'ouest pour leur croissance mycélienne sur milieu marine (19,45g/L de NaCl). Aucune différence significative de croissance n'a été observée entre les souches des 3 groupes (nord/sud/ouest).

Jusqu'à présent en France, 5 groupes génétiques ont été identifiées sur plantes (Walker et al. 2015b). Ainsi, une question reste en suspens concernant ces 8 groupes génétiques observés dans

l'air : à quoi correspondent-ils ? Ces groupes correspondent-ils à ceux trouvés sur plantes ? Si oui, à quoi correspondent les 3 groupes supplémentaires ? Est-ce que ce sont des groupes provenant d'autres plantes, ou d'autres origines ? Pour répondre à ces questions il sera nécessaire de réaliser une méta-analyse des données de génotypage de *B. cinerea* disponibles en France et au-delà (comme évoqué dans la partie précédente de ce rapport).

Les données recueillies sur *B. pseudocinerea* dans l'air tendent également à montrer que l'origine de l'inoculum aérien n'est pas seulement locale. Dans l'étude des souches aériennes de *B. cinerea*, nous avons vu précédemment qu'en moyenne 9.8% se révélaient être des souches de *B. pseudocinerea*, mais les proportions quotidiennes étaient très variables et pouvaient atteindre des niveaux élevés, avec deux pics remarquables en février 2008 et en février 2010 (50 et 47%, respectivement) (A11). Ces variations n'étaient liées à aucun paramètre météorologique local ni à l'origine des masses d'air. Nous avons cependant constaté que *B. pseudocinerea* était plus abondant dans l'air en hiver. Sur les plantes, la fréquence de cette espèce cryptique semble être plus élevée au printemps (Fekete et al. 2012 ; Walker et al. 2013). La question qui émane de ces différentes observations concerne la localisation des sources libérant des isolats de *B. pseudocinerea* au moment où des pics ont été observés. Bien que la gamme d'hôtes spécifique de *B. pseudocinerea* ne soit pas connue, on peut supposer que cet inoculum a été émis, soit par des réservoirs environnementaux locaux, soit par des cultures agricoles précoces situées dans un environnement plus chaud, c'est-à-dire sous des latitudes plus méridionales, et donc éloignées du lieu de collecte à Avignon.

3-3 Notion de connectivité aérienne

Dans la partie 3-1 nous avons vu que sur la région d'Avignon, les masses d'air empruntent classiquement 3 types de trajectoires (origine du nord, du sud et de l'ouest, très rarement en provenance de l'est). Les trajectoires de masses d'air arrivant dans une région donnée sont influencées par le relief, par le mouvement global des masses d'air à l'échelle terrestre et les saisons. Pour un jour donné, ces trajectoires sont accessibles grâce au logiciel HYSPLIT mais cela ne représente qu'une trajectoire ponctuelle. En 2017, Cindy Morris s'est demandé s'il était possible de déterminer la fréquence de connexions par l'air entre deux sites géographiques, c'est-à-dire s'il était possible de connaître les échanges récurrents entre deux points donnés pour une saison donnée. Elle a adressé cette question à Samuel Soubeyrand qui a développé une méthode pour évaluer la connectivité aérienne. Le taux de connectivité aérienne directionnelle entre un site A et un site B illustre la fréquence des masses d'air arrivant au point A et étant préalablement passée au point B (A2).

J'ai proposé d'utiliser un jeu de données d'inoculum aérien pour valider la méthode et faire progresser les outils permettant d'étudier la dissémination aérienne. De l'inoculum aérien de *S.*

sclerotiorum a été collecté dans 4 régions et génotypé: nord (Arras), nord-ouest (Manche), centre-ouest (Charentes) et sud-ouest (Gironde), dans le projet SCLEROLEG. La connectivité aérienne directionnelle entre chaque couple de régions a été évaluée en exploitant les données météorologiques archivées fournies par le système d'assimilation de données globales (GDAS) de NOAA et du logiciel HYSPLIT (Stein et al. 2015; Rolph et al. 2017). Pour chaque jour entre le 1/01/2008 et le 31/12/2017, soit une période de 10 ans, HYSPLIT a permis de reconstituer les trajectoires des masses d'air arrivées un jour donné dans une région donnée (Fig. 21).

Les résultats montrent que le taux de connectivité aérienne entre deux sites varie selon la direction et le mois considéré (A2). Par exemple, il a été montré que, de 2008 à 2017, les régions nord et nord-ouest étaient connectées de manière significative, mais plus fortement du nord-ouest vers le nord, tandis que les régions Sud-Ouest et Centre-Ouest présentaient des taux de connectivité élevés, mais dans les deux directions. Enfin, dans certaines régions, les taux de connectivité aérienne étaient faibles (par exemple, sud-ouest vers le nord et nord-ouest). Cette connectivité directionnelle correspond aux mouvements de masse d'air qui changent avec les saisons.

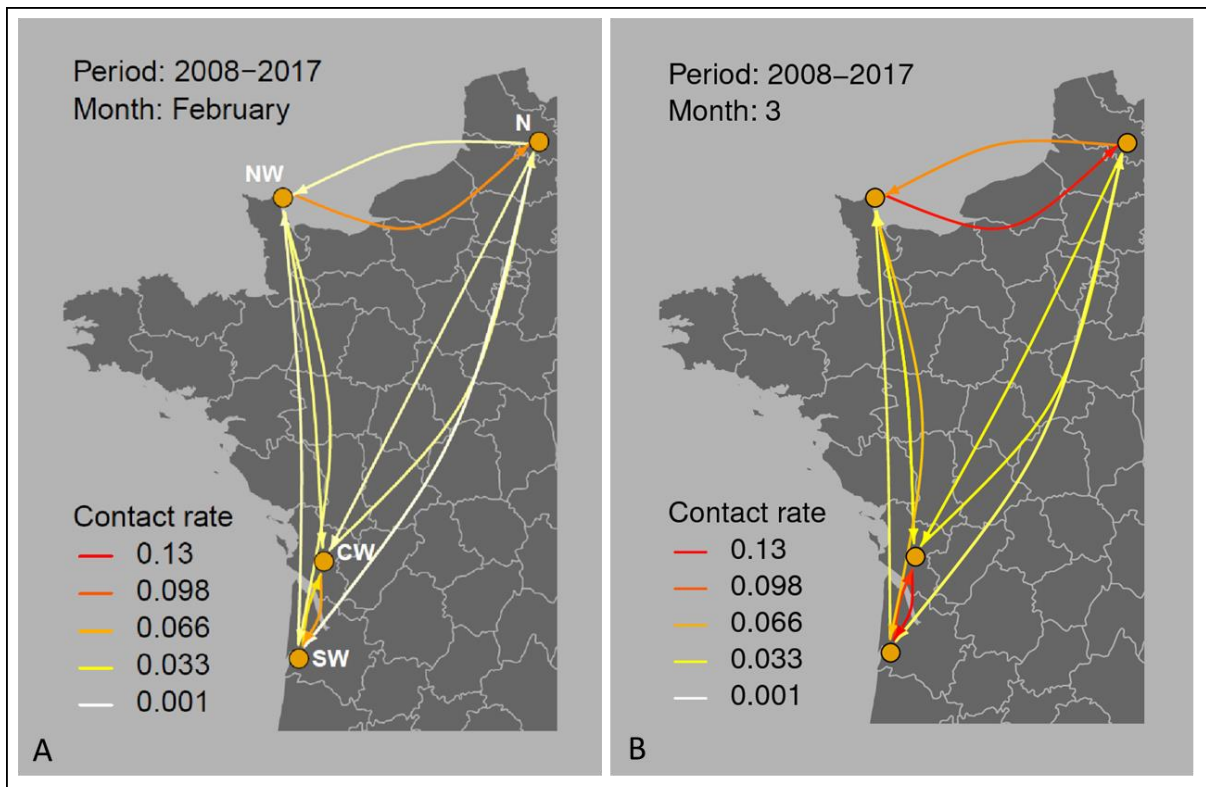


Figure 21 : connectivité aérienne du mois de février (A) et mars (B), évaluée avec HYSPLIT à partir de données météorologiques archivées sur la période 2008–2017.

D'autre part, les souches aériennes de *S. sclerotiorum* ont été génotypées. Parmi les 498 souches génotypées, 241 profils haplotypiques ont été identifiés, dont 69 étaient portés par au moins 2 souches. Dix-huit de ces haplotypes étaient portés par des souches provenant de régions différentes (Fig. 22). La distance entre deux régions avec des souches ayant le même profil haplotypique pouvait s'élever à 700 km (sud-ouest/nord). Les niveaux de différenciation génétiques entre souches collectées dans les différentes régions étaient faibles ou non significatifs.

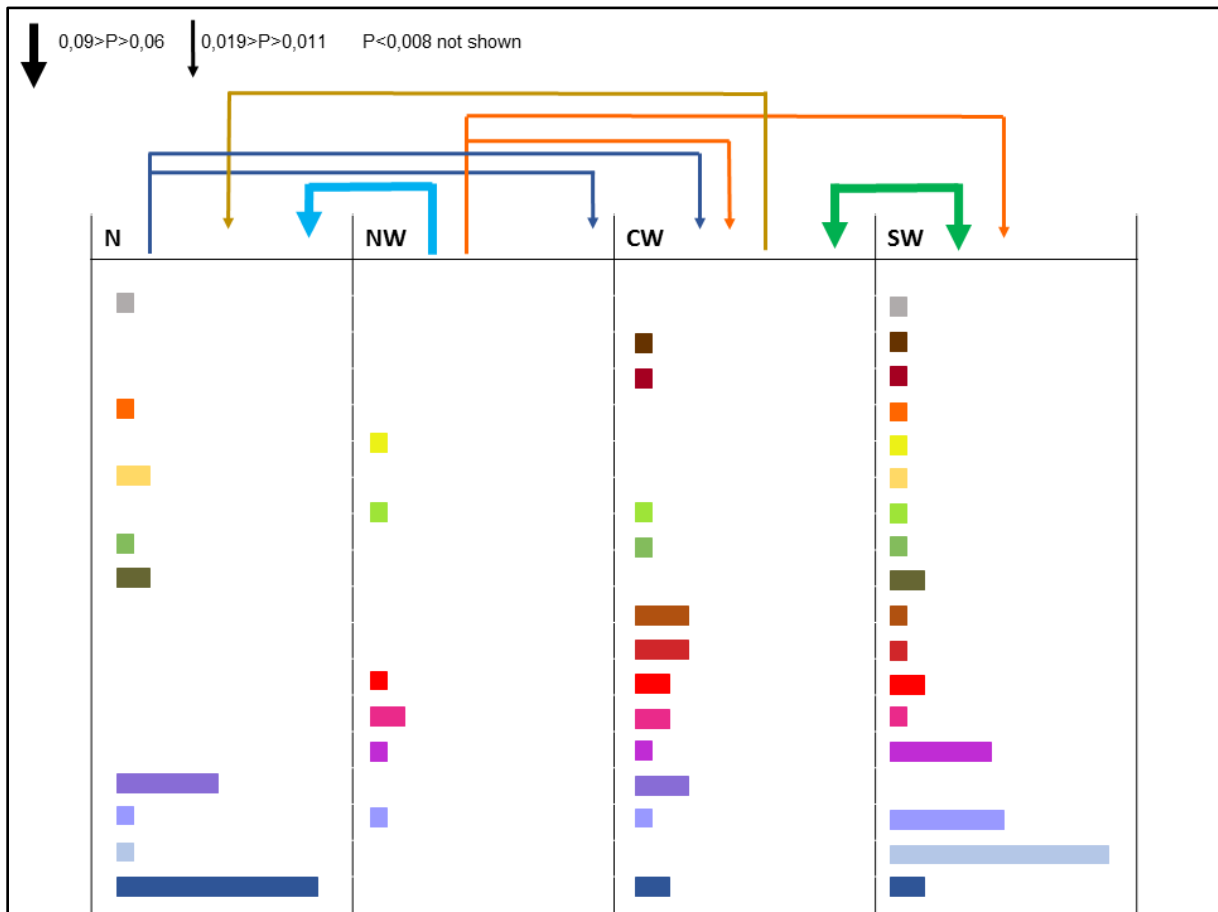


Figure 22 : Souches de *S. sclerotiorum* collectées dans différentes régions (nord, nord-ouest, centre-ouest et sud-ouest) et profils haplotypiques qu'elles ont en commun (chaque couleur correspond à un haplotype, la largeur du rectangle indique le nombre de souches portant cet haplotype). Les flèches au-dessus des colonnes indiquent la connectivité aérienne entre les régions (plus la flèche est large, plus la connexion est intense).

La confrontation des données de connectivité aérienne et des données génétiques a montré que la connectivité aérienne est plus informative que la distance géographique entre deux sites pour expliquer la part d'inoculum exogène arrivant en un site donné. La connectivité aérienne ajoute des informations sur la direction des échanges potentiels via l'atmosphère que la distance géographique ne peut pas fournir. Cette information est particulièrement intéressante car elle permet d'identifier plus précisément le rôle de chaque site en tant que source ou puits de spores. On peut donc supposer que les souches ayant des haplotypes identiques dans deux régions sont

plus susceptibles d'avoir été émises par celle ayant une connectivité aérienne dirigée vers l'autre (telle que NW vers N par exemple). Le fait que la connectivité aérienne soit plus informative que la distance géographique peut être dû aux mouvements des masses d'air entre deux sites qui ne sont pas simplement liés à la distance linéaire parcourue mais également à la topographie, au climat et au mouvement global des masses d'air sur la surface terrestre. Prenons l'exemple des régions NW et N de la présente étude : la connectivité aérienne reflète les mouvements généraux des masses d'air qui pénètrent souvent sur le territoire français par la façade atlantique et se déplacent vers l'intérieur des terres. En revanche, la distance géographique (environ 300 km) ne donne aucune information sur la fréquence et la direction des échanges aériens entre le nord-ouest et le nord.

4- CONCLUSION ET PERSPECTIVES

4-1 Origine de l'inoculum

Dans ces différentes études nous avons généré des données quantitatives et qualitatives qui tendent à montrer que l'origine de l'inoculum aérien de *B. cinerea* et *S. sclerotiorum* collecté en un point donné est composite et rarement à 100% d'origine locale. Nos résultats prouvent qu'une partie de l'inoculum aérien a une origine distante, jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres.

Les outils et les méthodes analytiques présentés dans ces différentes études peuvent être encore développés et améliorés pour rechercher l'impact respectif de l'inoculum aérien provenant de sources locales et de celui provenant de sources distantes en vue de mettre au point des stratégies de protection des cultures efficaces.

4-2 Connectivité aérienne

La connaissance de la connectivité (sa direction entre les sites) aux niveaux régional et mondial est utile pour établir des stratégies de mise en place de réseaux d'épidémiologie-surveillance des champignons à dissémination aérienne. Dans la pratique, les dispositifs de surveillance des spores pourraient être placés sur les sites existants de réseaux météorologiques ou sur des bâtiments surélevés (des phares par exemple), ou sur des stations de mesure du flux de particules atmosphériques. La mise en place de dispositifs de piégeage en amont du site Nord-Ouest par exemple, le long de la frontière océanique, pourrait aider à identifier les spores provenant de l'extérieur du territoire français. Il est important d'obtenir des informations sur l'inoculum aérien susceptible d'arriver dans un territoire, car les caractères des souches exogènes peuvent différer de ceux des souches endogènes et peuvent parfois conduire à des épidémies plus dommageables. Par exemple, les pays d'origine de l'inoculum pourraient avoir des politiques d'utilisation de fongicides différentes des politiques françaises. Dans ce cas, les souches fongiques entrantes

pourraient développer une résistance aux fongicides non encore déployés en France ou réservées à une utilisation en cas de risque extrême pour les cultures. Si de telles souches parviennent à se multiplier en France, elles peuvent conduire à une modification de la population fongique endogène rendant ainsi caduque l'utilisation de certains fongicides. Différents systèmes de culture ou climats peuvent également entraîner des souches plus agressives ou plus robustes que les souches endogènes. Enfin, si une population fongique d'une espèce donnée est plus diversifiée que la population endogène locale, il faudra peut-être modifier le choix des cultivars, sans quoi la résistance pourrait être contournée par la première arrivée d'inoculum exogène aérien.

4-3 Projet Tropolink

Le développement d'un outil pour l'utilisation de données de connectivités aériennes est particulièrement attendu et prometteur. Cet outil nommé Tropolink est en cours de développement (le porteur du projet est S. Soubeyrand, BioSP) sous réserve de financements. Dans le projet tel que soumis à l'AAP 2018 du département SPE (mais malheureusement non accepté pour financement début 2019), je fais partie des utilisateurs test finaux. L'outil final tel qu'il a été imaginé sera une plateforme Web laquelle l'utilisateur pourra déterminer les taux de connectivité aérienne entre les zones qui présentent un intérêt pour ses recherches.

Voici comment j'envisage de me servir de l'outil dès qu'il verra le jour:

- Définition de plans (spatiaux et temporels) de monitoring

Avant de se lancer dans du monitoring très lourd à réaliser il serait intéressant de connaître les zones qui sont connectées et donc les zones dans lesquelles on doit positionner des samplers, mais également les moments de l'année pendant lesquels ces zones sont statistiquement les plus connectées. Cela rendrait plus efficaces les monitorings.

- Etude de dispersion entre des bassins de production :

Pour une maladie émergente dont on sait peu de chose, dans une zone donnée, avoir accès aux graphes de connectivité peut permettre d'étayer (ou pas) l'hypothèse d'une arrivée via l'atmosphère. Par exemple pour la fusariose de l'ail, cela permettra de tester l'hypothèse de connectivités aériennes significatives entre les différents bassins de production (sud-est/sud-ouest/nord + autres bassins européens) et donc de la propagation aérienne de la maladie.

- Etudes de dispersion transocéanique :

Avec cet outil, j'aimerais étudier les connectivités de part et d'autres d'étendues marines/océaniques car je m'interroge sur ce qui est susceptible d'arriver sur la façade atlantique et sur la façade méditerranéenne, en provenance de divers pays, à différents moments de l'année. Peut-on recevoir des souches de *Sclerotinia* de nos voisins britanniques ou de nos voisins canadiens par exemple ? Faut-il penser les systèmes de prévision de risque épidémique à l'échelle globale ? Avoir des données de connectivité à l'échelle globale permettra aussi de savoir si la

politique en matière de protection des plantes dans un pays lointain peut avoir un impact sur la protection des plantes en France, ou si les sélectionneurs doivent prendre en compte l'arrivée potentielle de souches particulières, d'origine lointaine.

4-4 Vers un outil d'aide à la décision

La finalité globale de toutes les études présentées dans ce document de synthèse est de générer des connaissances pour évoluer vers des stratégies de protection des plantes efficaces, durables et plus respectueuses de l'environnement. Un moyen d'accompagner les producteurs dans cette évolution est le développement d'outils d'aide à la décision (OAD).

Dans le cadre du projet COPAIRNIC, j'ai rendu visite à des collègues québécois d'AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada) notamment Odile Carisse et Mathieu Tremblay, localisés à Saint Jean sur Richelieu. Ils m'ont expliqué comment, en co-construction avec les agriculteurs et avec une firme privée de recherche-développement (Prisme-Phytodata, Hervé van der Heyden) ils ont abouti à un OAD opérationnel (concernant notamment *B. squamosa* de l'oignon) qui est utilisé dans le bassin des terres noires, une région agricole située au sud de Montréal. Les collègues ont adapté des capteurs de spores autonomes (sur panneau solaire) qui sont disposés dans les parcelles (qui font a minima 10 ha). Chaque agriculteur qui souhaite que sa parcelle soit monitorée paie environ 1000 dollars à l'année à Prisme-Phytodata. Un technicien de Prisme passe 3 fois par semaine collecter les bâtonnets sur lesquels se trouvent les spores et réalise une PCR quantitative dans les heures qui suivent dans les locaux de la firme située dans le bassin des terres noires. Les données sont envoyées par mail aux agriculteurs dans la journée (données de leur capteur et de ceux des environs). Les agriculteurs reçoivent également les données de dépistage des symptômes et des modèles de prévision. Si besoin ils peuvent discuter avec un conseiller pour interpréter les données et prendre une décision. A partir de là les agriculteurs décident de traiter ou pas leur culture. Globalement, en moyenne, les traitements anti *Botrytis* sont passés de 18/an (dans les années 80) à 6 ou 10/an à l'heure actuelle. L'outil est aujourd'hui utilisé pour d'autres pathosystèmes (*Bremia lactucae* sur laitue, *Phytophthora infestans* sur Pomme de terre).

Cette success story a pris du temps : 20 ans se sont écoulés entre la première demande des agriculteurs pour un outil leur permettant de réduire les traitements contre *B. squamosa* sur oignon et l'utilisation en routine de l'outil. Elle m'a fortement inspirée.

Un tel outil est utilisable dans le bassin des terres noires car tous les agriculteurs, ainsi que le labo d'analyse, sont localisés dans un rayon de 50 km, ainsi que les laboratoires de la firme qui fait les analyses. Ainsi les résultats sont disponibles en quelques heures. Les collègues souhaitaient faire la même chose avec les producteurs de tomate sous serre. Or, ces producteurs sont beaucoup plus éparpillés et cela ne permet la même organisation centralisée. Du coup je m'interroge sur la forme que devrait prendre un OAD dans les régions horticoles du sud de la France. La localisation des

exploitations doit être prise en compte pour créer un OAD adéquate et définir l'entité qui gèrera les monitorings, les analyses et les conseils.

A l'heure actuelle, comme finalité de mes recherches, je penche pour un couplage entre un modèle de prévision comme COPAIRNIC et du monitoring ciblé. Voici à quoi cela pourrait ressembler à termes, dans quelques années :

Imaginons une zone cible autour d'Avignon et des cultures sensibles à *B. cinerea*. Les trajectoires des masses d'air sont modélisées en temps réel à l'échelle globale (Fig. 23) par le modèle COPAIRNIC qui intègre les données météo d'Hysplit.

Des capteurs sentinelles sont positionnés sur des zones concentrant des cultures sensibles à *B. cinerea* (donc potentiellement émettrices de spores) et présentant une connectivité aérienne forte avec la région d'Avignon. Ils quantifient en temps réel les flux de spores entre la surface et l'atmosphère (ascendants ou descendants). Des capteurs sentinelles sont également localisés dans la zone cible. Ainsi l'inoculum aérien, qu'il ait une locale ou origine lointaine distante, est pris en compte.

Les données des capteurs sentinelles sont envoyées au modèle COPAIRNIC qui prédit l'abondance de spores viables par unité de volume d'air dans la zone cible. En fonction de cette valeur et d'un seuil qui aura été préalablement défini, le monitoring local dans la zone cible est déclenché.

Les capteurs quantifient et caractérisent les spores (agressivité potentielle, résistance à certains fongicides....). Les données sont transmises automatiquement à un modèle climatique qui évalue le risque de déclenchement épidémique.

Les sorties de ce modèle sont transmises aux agriculteurs ou techniciens agricoles qui peuvent alors agir en conséquence.

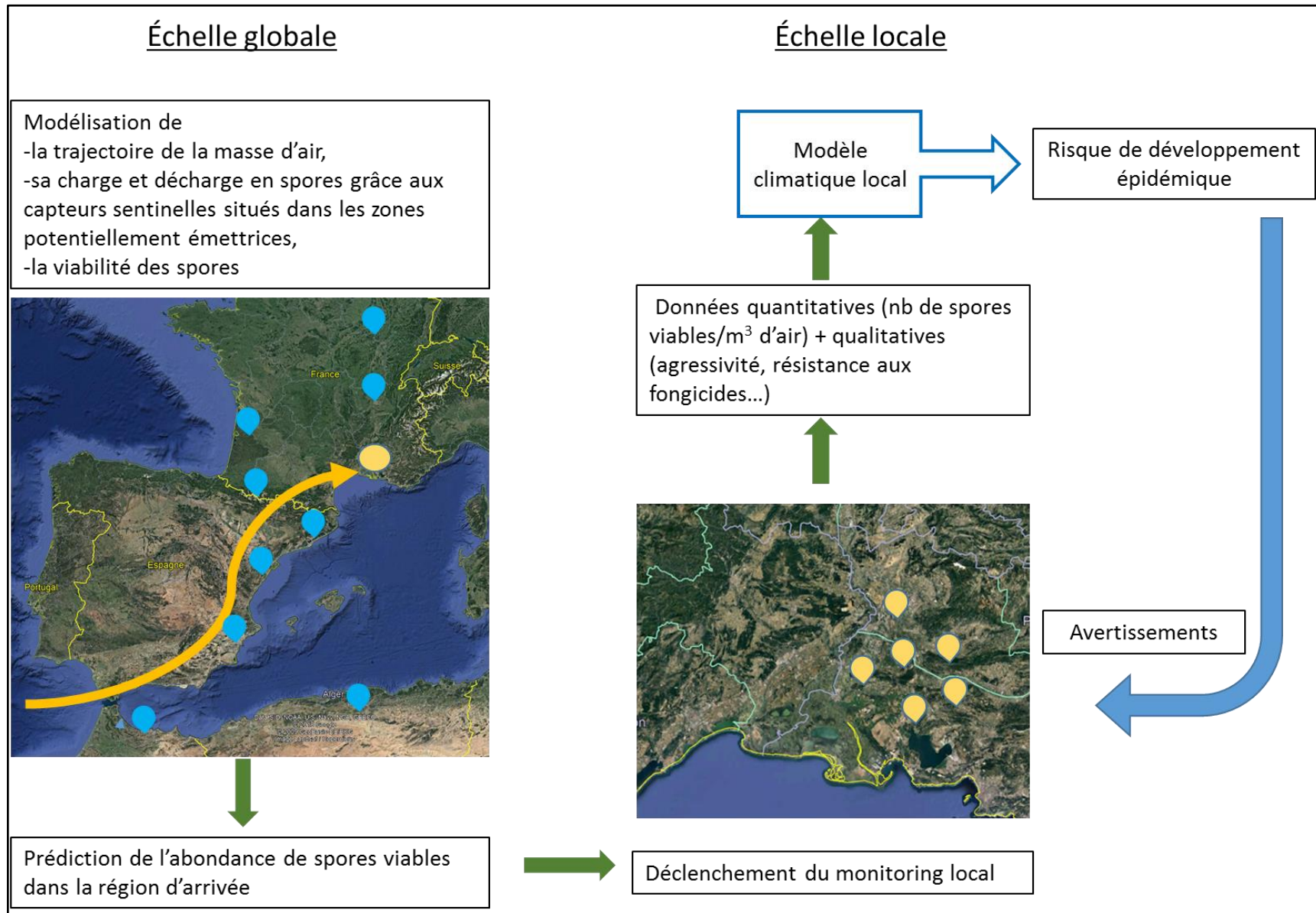


Figure 23 : prévision des risques épidémiques tenant compte de l'échelle locale et globale.

MANAGER UN COLLECTIF HUMAIN

Pour terminer cette synthèse sur mes activités de recherche et liées à la recherche, je tenais à rédiger ce paragraphe sur les aspects de management de collectif humain car tout au long de ma carrière j'ai beaucoup appris à ce sujet (par l'expérience et par les formations suivies). A l'heure actuelle je suis directrice adjointe d'une unité de 42 permanents (plus particulièrement chargée des ressources humaines ITA, ingénieurs techniciens administratifs). Pour mes expérimentations je travaille avec 2 techniciennes et j'encadre (ou co-encadre) chaque année des stagiaires et depuis 2018 un doctorant.

Je suis intimement convaincue qu'une recherche efficace, produisant des résultats fiables et conséquents est avant tout basée sur un collectif humain (une équipe, des collaborateurs dans un projet...). En effet la réussite est souvent collective. Un jeune chercheur recruté aujourd'hui, devra être demain, en mesure d'animer un équipe, une unité voir plus, de solliciter des collaborations, d'animer des projets, de gérer des conflits etc... Pourtant à l'heure actuelle les chercheurs sont essentiellement recrutés sur la base de l'excellence scientifique, sans réelle prise en compte du niveau compétences en gestion des ressources humaines. De mon point de vue, cela ne suffit pas toujours pour faire de ces jeunes chercheurs des collaborateurs capables d'assumer les responsabilités de management (d'équipe, d'unité, de projet, d'institut) qu'ils devront endosser à un moment ou à un autre de leur carrière. Ainsi je m'efforce de sensibiliser et former les étudiants que j'encadre à des notions de management que je pratique au quotidien. Parmi celles-ci il me semble qu'un chercheur-manager doit maîtriser l'écoute active, être capable d'identifier des situations conflictuelles, de faire de la médiation, être formé aux règles de communication, à la conduite d'entretiens et à la gestion des compétences entre autres.

Je fais ici le point sur quelques aspects de management qui me semblent primordiaux et sur ce que j'ai mis en place au cours de ma carrière pour les améliorer.

1- COMMUNIQUER

Tout au long de ma carrière, et encore plus depuis que je suis DUA, j'ai constaté à quel point une communication interpersonnelle mal maîtrisée peut conduire à des situations problématiques, voire conflictuelles. J'ai suivi un parcours scolaire classique (classe prépa, école d'ingénieur) au cours duquel je n'ai jamais eu aucun cours de communication, et c'est le cas de la très grande majorité des collègues que je côtoie (quel que soit leur niveau d'étude ou leur âge).

De ce fait, une fois dans le monde du travail on se retrouve un peu démuni. Au sein d'une équipe, comment exprimer une divergence d'opinion sans agressivité ? Comment s'affirmer sereinement ? Comment faire face à un interlocuteur agressif ? etc...

Puis une fois en position de manager, comment donner clairement et posément des consignes et directives ? Comment recevoir la parole d'un collègue en souffrance? Comment gérer un conflit entre deux personnes ? etc...

J'ai eu la chance de suivre une formation de management sur 9 jours répartis sur 6 mois avec deux très bons formateurs (2015-16, P. Belpaeme et H. Prost). En 2017, j'ai choisi de suivre une formation de 3 jours en analyse transactionnelle pour comprendre comment chacun d'entre nous se positionne par rapport aux autres et comment cela impacte la communication entre les individus (S. Gerbaud). La perfection en communication n'existe pas mais voici les points et notions que j'ai retenus, et que je tâche d'expliquer lorsque les situations le nécessitent.

1-1 Le cadre de référence

Dans la communication interpersonnelle, entre l'émetteur et le récepteur il y a deux types de filtres : les gestes et attitudes (ce que l'on montre mais que l'on ne maîtrise pas) et le cadre de référence (culture, éducation, histoire, valeurs, expériences, croyances...). Je suis régulièrement confrontée à des situations de blocage entre des agents, que je dois gérer, qui reposent sur un défaut d'acceptation du cadre de référence de l'interlocuteur. En effet pour que la communication soit possible il faut d'emblée accepter d'aller vers le cadre de référence de l'autre : accepter que l'autre ait un autre point de vue, sans avoir plus tort ou raison.

Dans une équipe, même si les collaborateurs partagent les mêmes objectifs, ils n'ont pas forcément la même façon de travailler (exigence par rapport au rangement, à l'organisation, la planification etc...). L'acceptation du cadre de référence est une des choses dont j'essaie de faire prendre conscience (c'est une première étape) pour essayer d'assainir des situations de blocage entre deux agents.

De même, lorsque les agents sont candidats à des concours (internes ou externes) pour évoluer dans leur carrière, j'insiste sur cette notion de cadre de référence dans la préparation de leur dossier ou leur oral : les membres de jury n'ont généralement pas le même cadre de référence que les candidats (unité, cœur de métier différents) et donc les candidats doivent faire un effort pour expliciter leurs propos (contexte, enjeux...), car ce qui est évident pour soi, ne l'est pas forcément pour les autres.

1-2 Les dangers de l'interprétation

La notion de cadre de référence a été complétée de façon cohérente par la formation sur l'analyse transactionnelle. Lors de cette formation j'ai découvert les différents états d'un individu qui impactent significativement sa façon de se positionner par rapport aux autres et de communiquer. La formatrice nous a fait prendre conscience du fait que chaque personne fait les choses pour elle-même et par rapport à elle-même. Ainsi il est inutile, et la plupart du temps néfaste, d'interpréter

les paroles d'un interlocuteur (il sous-entend que.., c'est sûr il veut dire que...). L'interlocuteur est le seul à vraiment connaître l'intention qu'il met dans ses paroles. Ainsi, en partant du principe que l'interlocuteur est bienveillant, la communication peut être plus neutre et plus efficace. Si les propos de l'interlocuteur nous dérangent, autant lui exprimer cela tout de suite pour désamorcer un éventuel malentendu. Cela peut être fait via un questionnement ou une reformulation. J'alerte régulièrement les agents de l'unité sur les dangers de l'interprétation et j'en appelle à la bienveillance réciproque, autant que faire se peut.

1-3 L'assertivité

En maîtrisant les deux notions précédentes on peut pratiquer l'assertivité. L'assertivité désigne la capacité à s'exprimer et à défendre ses droits en respectant ceux des autres. C'est un comportement qui permet d'éviter les conséquences néfastes de comportements d'agression, de soumission et de manipulation. En analyse transactionnelle l'assertivité peut se traduire par deux personnes qui communiquent en position d'adulte (non d'enfants ou de parents) et sont donc capables d'être d'accord sur le fait qu'elles aient des opinions divergentes.

2-VALORISER ET RECONNAITRE LES COMPETENCES

A l'heure actuelle, une carrière professionnelle complète dure plus de 40 ans. Pour un manager qui œuvre dans un institut où il y a peu de turn-over et des salaires modérés (sur lesquels on n'a aucune prise), le challenge est d'arriver à motiver ses collaborateurs, années après années.

Dans la théorie de Maslow (1943) comme dans celle de McClelland, on constate qu'au sein de son travail, un individu aspire à combler le besoin de reconnaissance. Cela peut passer par un travail utile, apprécié, varié, par l'expression et la reconnaissance des compétences, par le fait d'être apprécié, respecté et de se l'entendre dire, par la participation à la définition des objectifs professionnels. Je m'attache à mobiliser autant que faire se peut ces différents leviers de motivation.

2.1 Les signes de reconnaissances

Au cours de mes formations j'ai découvert la notion de « stroke ». Dans la théorie de l'analyse transactionnelle cela signifie « signe de reconnaissance ». Tout être humain, pour se développer normalement, a besoin de strokes, qu'ils soient positifs ou négatifs. Il en est de même dans le monde du travail. Or, sans formation de management, on a tendance à dire quand les choses ne vont pas, mais on les passe sous silence quand elles vont bien. Du coup, en tant que manager, j'ai pris conscience de la nécessité de dire aux personnes concernées les choses qui ont bien fonctionné. Lorsque qu'une remarque d'amélioration ou un constat d'échec est mentionné il peut

être reçu à sa juste valeur et pris en compte s'il intervient dans un cadre où les réussites, comme les échecs, sont évoqués.

Le plus régulièrement possible, je tâche de donner des signes de reconnaissance positive à mes collaborateurs (subordonnés comme supérieurs hiérarchiques). J'encourage les managers à le faire également. Cela peut paraître trivial, mais donner des signes de reconnaissance positifs n'est pas une chose spontanée pour tout le monde. Ainsi lors des entretiens annuels d'activité je mentionne avec chaque agent les points positifs de ses activités lors de l'année écoulée. Si besoin, par la suite j'aborde les points à améliorer. De plus, je vérifie que les non-permanents que j'encadre, et qui bénéficient de l'aide du staff technique de l'unité, pensent à les remercier à l'oral et dans leurs rapports écrits. En ce qui me concerne, j'indique en co-auteur de mes articles les technicien-ne-s qui ont significativement contribué à l'obtention des résultats. Je les avertis lorsqu'un article est soumis et accepté. Je sais que c'est un élément qui donne aux techniciennes avec qui je travaille le sentiment que leur travail est utile et qu'il débouche sur quelque chose de concret.

2.2 Organisation et évolution des compétences

Au sein d'une unité de recherche, tous les individus n'ont pas les mêmes désirs en terme d'activité : certains recherchent un maximum d'autonomie, ont besoin de prendre des initiatives, de relever des challenges, d'autres préfèrent le cadre rassurant d'une certaine routine. Ceci s'accolle à des degrés divers de compétences. Un manager se doit d'adapter son type de management (du plus directif au plus déléгатif) à ces différentes personnes. Pour cela il est important de bien se connaître en tant que manager au départ. Les différentes formations que j'ai suivies m'ont permis de mieux me cerner et donc de m'adapter à mes collaborateurs. Naturellement j'ai un type de management de type M2, et au fur et à mesure j'ai appris à déléguer pour adopter un management de type M3 (Fig. 24). Pour chacun de mes projets de recherche je fais en sorte de bien délimiter les missions que je confie à chaque technicien en tenant compte de ses compétences mais aussi de ses aspirations d'évolution.

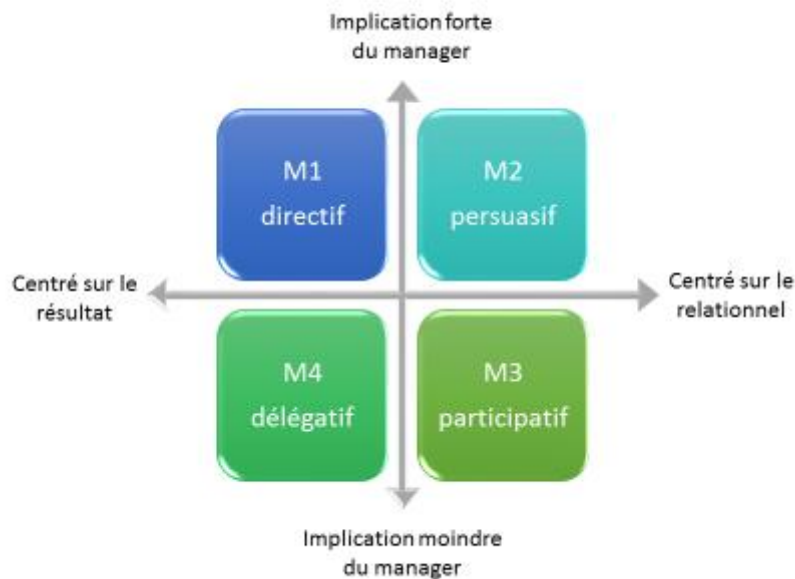


Figure 24 : les quatre principaux styles de management.

Dans mes activités de DUA, j'ai initié des groupes de travail au sein desquels les agents volontaires servent un objectif collectif et peuvent développer des compétences dans un cadre rassurant. Sous l'impulsion de Cindy Morris (DU de 2008 à 2013) qui souhaitait développer la notion de « social capital² » notre unité s'est mise à fonctionner de façon plus collégiale et notamment à travers des groupes de travail. Cindy confiait l'animation de ces groupes aux agents dont elle espérait voir évoluer les compétences. Avec le DU actuel (Marc Bardin) je perpétue ce mode de fonctionnement. J'ai par exemple initié la formation du groupe AQuaViT (Amélioration de la Qualité de vie au Travail), ainsi que les ateliers AIMIE (Atelier d'immersion dans les installations expérimentales). Le groupe AQuaViT, né en 2018, a pour mission d'organiser et de proposer des actions pour la cohésion et le bien-être au sein de notre unité. Les 5 agents impliqués (de DR à TR) sont volontaires. J'ai confié l'animation du groupe à un agent qui souhaitait améliorer sa capacité à s'exprimer en public, sachant que les agents du groupe plus expérimentés allaient l'accompagner dans ce sens. Les réalisations du groupe après 6 mois d'existence sont au-delà des espérances. En 2016, avec le responsable des installations expérimentales (IE) (Joël Béraud), nous avons lancé les ateliers AIMIE. Chaque nouvel arrivant dans l'unité (stagiaire, doctorant, visiteur, recruté) passe une matinée dans les IE (unité de production de plantes saines, serres, parc de chambres climatisées), avec les agents de l'IE pour découvrir le cœur de nos activités de recherche, (l'expérimentation végétale) et comprendre comment ce service collectif est le socle de notre unité. Ainsi les agents des IE, qui étaient peu habitués à faire des présentations en réunion, passent

² Social capital : networks together with shared norms, values and understandings that facilitate cooperation within or among groups (définition de l'OCDE).

désormais du temps à expliquer et montrer leurs activités aux participants des ateliers (environ 15 demi-journées par an). Cela les entraîne à l'expression orale devant des personnes et cela leur permet de montrer combien leur travail est important. Ils peuvent également valoriser cette activité dans le cadre d'instances de promotions (CIPP, Sélection professionnelle).

A mon sens, développer une compétence transversale au sein d'un groupe de travail de l'unité permet aux agents de prendre confiance. Ils peuvent ensuite, s'ils le souhaitent, compléter cela par des formations puis se lancer aussi en dehors de l'unité.

2.3 Promotion

En 2010 j'ai eu la chance de réussir le concours interne de promotion sur place (CIPP) de l'INRA, ce qui m'a permis de passer du corps des ingénieurs d'études à celui des ingénieurs de recherche. Les CIPP qui ont lieu tous les deux ans, sont un gros enjeu dans une carrière d'ITA à l'INRA. Ils permettent de passer au corps supérieur (sans attendre d'être promu par ancienneté à 6 mois de la retraite) mais ils sont très concurrentiels avec des taux de pression qui tournent autour de 1/20. Lors la préparation aux CIPP j'ai bénéficié de l'aide de tous les collègues que j'avais sollicités (intra et hors unité). A cette occasion j'ai constaté que la réussite est une affaire collective. Dès lors je me suis dit que je rendrai toute l'aide qu'on m'avait apportée pour aider d'autres candidats. C'est ainsi qu'en 2014 j'ai proposé au DU de former et d'animer au sein de notre unité un groupe baptisé « Cellule concours ». La Cellule concours, composée de 5 collègues, accompagne et épaulé les candidats de l'unité dans la préparation de leur dossier de concours (CIPP et examen de sélection professionnelle), puis s'ils sont admissibles, dans la préparation des oraux. Je prends également du temps avec chacun des candidats admissibles pour parler de notions de communication (langage verbal, non verbal, cadre de référence etc...) afin qu'ils mettent toutes les chances de leur côté. Depuis 5 ans que ce groupe existe, nous avons de bons taux de réussite aux CIPP. Les collègues candidats savent qu'ils ne sont pas seuls dans cette épreuve et qu'ils seront accompagnés et encouragés. C'est devenu un élément fort de cohésion de notre unité. Personnellement, en tant que DUA et animatrice de cette cellule, je retire une grande satisfaction de toutes ces réussites individuelles, année après année, qui pour moi représentent avant tout une réussite significative de notre collectif de recherche.

En 2018, j'ai vécu encore plus intensément l'expérience des CIPP puisque j'ai été sollicitée par la DRH de l'INRA pour présider le concours de passage du corps des techniciens (TR) au corps des Assistants ingénieurs (AI). J'ai ainsi formé un jury de 12 personnes motivées pour accomplir cette lourde tâche au service du collectif de l'Institut. Nous avons analysé 229 dossiers de candidats sur la base de critères que nous avons collégialement décidés. A l'issue d'un processus jalonné de réunions d'admissibilité puis d'oraux d'admission, au cours duquel nous avons strictement respecté l'égalité et l'impartialité pour chaque candidat, nous avons déclaré admis 17 candidats.

J'ai estimé que cette mission a occupé 1.5 mois à temps plein de mon année 2018. Au-delà des tâches logistiques et administratives qui incombent à un président de concours, la partie la plus lourde est le retour aux candidats non admis (et qui peuvent demander un entretien au président). J'ai ainsi réalisé plus de 70 entretiens téléphoniques pour expliquer les raisons de la non admissibilité/non admission et proposer des pistes d'amélioration à des agents présentant différents degrés de déception/frustration. Cette phase d'entretien post-concours peut être déterminante dans la carrière des agents recalés : soit renforcer leur incompréhension et les dégoûter du système, soit, au contraire, leur faire prendre du recul et leur donner la possibilité de mieux valoriser leurs activités dans le cadre d'un futur concours. Pour mener à bien cette mission j'ai mis en œuvre toutes les compétences décrites ci-dessus ainsi que toute la bienveillance dont je suis capable. L'expérience de cette présidence de CIPP a renforcé ma capacité à décrypter les activités des agents et à entrevoir leurs possibilités d'évolution.

3-CONCLUSION ET PERSPECTIVES

J'apprécie beaucoup mes activités de management. Comprendre les humains, les accompagner pour leur faire exprimer le meilleur d'eux-mêmes dans le cadre du travail est une tâche qui me passionne. Elle est parfois épuisante et ingrate mais elle me procure aussi de grandes satisfactions et surtout le sentiment de réaliser des choses qui ont un sens. En parallèle de mes activités de recherche *sensu stricto*, j'ai envie de poursuivre des activités dans ce domaine, au-delà de mon mandat de DUA (qui court jusqu'en 2022).

3-1 Formations

J'envisage de suivre de nouvelles formations en lien avec le management de l'humain.

En 2019 je prévois notamment de suivre le module 2 de l'analyse transactionnelle, ainsi qu'une formation dédiée à la gestion des conflits, qui sont tous deux inscrits au plan de formation de l'INRA Paca. J'ai même en tête de faire un jour un master en psychologie du travail. Mais à l'heure actuelle c'est seulement une envie, qui se transformera peut-être un jour en projet plus concret.

3-2 Groupes de travail

En ce qui concerne les groupes de travail au sein de l'unité de Pathologie Végétale, un nouveau groupe devrait voir le jour en 2019. Suite à des demandes de formation de type « gestes et posture » nous avons réfléchi avec la correspondante formation de l'unité (O. Berge), les agents de prévention (N. Truglio et M. Duffaud), et les services formation permanente et prévention de l'INRA Paca (E. Ferrari, B. Reynaud), à une formation plus globale sur l'ergonomie de travail. Cette conception plus globale démarre dès la conception d'un projet et s'intéresse à la faisabilité matérielle mais aussi humaine des expérimentations. La faisabilité humaine tient compte des

critères cognitifs, physiques et psycho-sociaux. Frédéric Vallée, référent formateur PRAPS à l'INRA (prévention des risques liés à l'activité physique) va venir en 2019 former les agents volontaires. Au-delà des formations individuelles, j'ai proposé que les agents formés constituent ensuite un groupe de travail qui aura pour objectif 1)-d'accompagner les collègues qui le demandent pour une analyse de leur situation de travail mais aussi de 2)-diffuser la culture de l'ergonomie globale du travail dans l'unité. Ainsi nous allons rentrer dans un processus pour intégrer une nouvelle culture dans l'unité, qui concerne tous les corps (du DR à l'AT) et qui devrait permettre d'améliorer le bien-être au travail tout en maintenant le niveau de qualité de nos recherches. Cette démarche s'apparente à la règle des 3R en expérimentation animale : Réduire (diminuer le nombre d'animaux utilisés), Remplacer (utiliser d'autres méthodes quand c'est possible), Raffiner (diminuer les contraintes et la douleur).

Pour illustrer cette évolution, voici un exemple qui devrait parler au plus grand nombre : imaginons qu'un chercheur a décidé d'inoculer 10 000 plantes. Il sait que cela peut être traité en 3 jours en mettant tout le staff technique dessus, en faisant des manipes très répétitives. Avec les 10 000 plantes il aura largement de quoi faire les analyses statistiques et aussi des plantes « au cas où ».

Après l'acculturation à l'ergonomie du travail, voici les questions que le chercheur devrait se poser : les 10 000 plantes sont-elles vraiment nécessaires ? puis-je réduire le nombre et avoir des tests statistiques robustes ? puis-je changer de test statistiques ? faut-il vraiment conserver les plantes « au cas où » ? peut-on faire moins de répétitions ? doit-on traiter les 10 000 d'un coup ou peut-on faire des lots plus petits pour rendre le travail moins répétitif ? les postes de travail peuvent-ils être échangés au bout de quelques heures afin d'éviter des troubles musculo-squelettiques et l'ennui? etc....

En faisant évoluer le travail dans ce sens l'objectif est de maintenir des travaux de recherche de qualité en protégeant autant que faire se peut le capital physique et la motivation des agents. Je pense que cette notion d'ergonomie globale du travail est essentielle à acquérir pour un jeune chercheur : pour lui-même et pour les différents collaborateurs avec qui il devra travailler au cours de sa carrière

3-3 Communication

En ce qui concerne la communication, il faut avouer qu'il est parfois difficile de passer des notions théoriques à la pratique, surtout lorsqu'on est directement concerné. Cependant, je pense qu'être conscient est déjà un premier pas vers une meilleure communication et vers une attitude bienveillante et ouverte envers ses collaborateurs (subordonnés comme supérieurs hiérarchiques). Je pense que des formations à la communication dans les filières scientifiques (écoles d'ingénieurs, universités), où lors de l'embauche des nouveaux recrutés, seraient utiles.

Ainsi, chaque agent pourrait être lucide sur sa façon de se positionner par rapport aux autres et pourrait avoir les outils pour pratiquer une communication interpersonnelle efficace et respectueuse. On pourrait approfondir certains points ou faire des piqures de rappel au cours de la carrière. De mon point de vue, chaque agent (du directeur de recherche à l'adjoint technique), devrait suivre une formation à la communication en début de carrière. J'ai soumis cette idée à B. Malpaux (DRH INRA) en janvier 2019. J'espère que cela débouchera sur quelque chose de concret et je me tiens à sa disposition s'il souhaite en discuter.

3-4 Système de promotion

En 2020 l'INRA fusionnera avec l'IRSTEA. Je suppose que certaines instances de promotion telles que les CIPP ou la sélection professionnelle devront être repensées (nous n'avons pas d'informations sur ce sujet à ce jour). Parce que je pense que ces instances sont un fort levier de motivation à l'INRA et parce que j'ai acquis l'expérience dans ce domaine, j'aimerais pouvoir participer à un groupe de travail pour réfléchir sur cette refonte, si un tel groupe de travail voyait le jour. De mon point de vue, un système dans lequel les promotions ne seraient basées que sur l'ancienneté présente un risque majeur de démotivation du collectif humain. De même, un système de promotion uniquement basé sur l'avis du supérieur hiérarchique présente un biais dans le sens où dans une relation difficile entre deux individus, il arrive souvent que les deux individus soient responsables. De plus cela pourrait créer des dissensions au sein des unités et des équipes et installer une atmosphère de compétition interne.

Le système des CIPP au-delà de ses biais (préparation variable des candidats d'une unité à l'autre, nombre de postes offerts extrêmement bas, lourdeur d'organisation ...) présente l'avantage de donner sa chance à chaque agent, quel que soit son diplôme de départ, son parcours, son domaine d'activité, son ancienneté, ses relations avec ses supérieurs hiérarchiques. De mon point de vue et de par mon expérience, je pense qu'il faut conserver ce type de système tout en l'optimisant pour le rendre moins lourd à gérer. J'ai rédigé un compte-rendu d'expérience de présidence de concours que j'ai remis au service concours de l'INRA dans lequel figurent des pistes d'améliorations.

En conclusion, je pense que le collectif humain est le socle de la recherche, bien avant les idées brillantes. Le collectif humain est une machine complexe mais extrêmement puissante lorsqu'elle fonctionne bien. Je suis convaincue qu'il faut investir du temps et de l'énergie dans cette machine pour que les idées brillantes puissent être testées et concrétisées.

CONCLUSION GENERALE

Dans la formation « conduite de projets » que j'ai suivie en 2010 (Algoé consultants) on nous a appris à définir les finalités d'un projet grâce à la méthode du « futur-passé ». On se projette dans le futur et on imagine que notre projet est un succès total : on définit en quoi c'est un succès total, sans censure, bref on s'autorise à rêver. A partir de là, en regardant en arrière à partir du futur, on peut définir les étapes à enchaîner à partir d'aujourd'hui pour arriver à ce futur. Dans cette conclusion je vais imaginer le futur idéal en lien avec les recherches que je mène aujourd'hui.

Dans ce futur idéal, dans une vingtaine d'années vers la fin de ma carrière, la protection des plantes se réfléchit à l'échelle des continents et parfois même à l'échelle de la planète. Raisonner l'implantation des espèces végétales en fonction de la connectivité aérienne des régions et des agents pathogènes aériens est entré dans les mœurs à l'échelle nationale, mais aussi continentale, grâce à des politiques internationales de gestion de la santé des plantes.

Tous les acteurs de la protection des plantes disposent d'OAD efficaces, conviviaux, en libre accès. Le modèle COPAIRNIC permet de prédire les mouvements de microorganismes à l'échelle globale. Des capteurs sentinelles localisés en surface quantifient et caractérisent les microorganismes du point de vue de leur agressivité (pour un pathosystème donné) en temps réel. Les valeurs de flux ascendants et descendants de microorganismes au-dessus des surfaces situées sur le parcours des masses d'air sont calculées instantanément et intégrées au modèle.

Les agriculteurs, les responsables d'espaces verts et les jardiniers amateurs ont accès à un site internet et une application mobile sur lequel ils rentrent leur code postal et le modèle indique s'il y a un risque d'épidémie pour un agent pathogène donné sur une espèce végétale donnée. L'OAD donne des préconisations en termes de pratique culturale, d'application de produits de bio-contrôle, de gestion des abris. L'utilisation des produits phytosanitaires a significativement baissé, dépassant largement les objectifs des plans Ecophyto. Le système est également utilisé pour les agents à dissémination aérienne ayant un impact sur la santé humaine et animale.

D'ici là, plus concrètement, arrivée en milieu de carrière je ressens le besoin d'aller découvrir de nouvelles choses, de nouveaux horizons, de nouvelles façons de travailler pour nourrir ma motivation et mon imagination. J'aimerais faire un séjour de quelques mois à l'étranger chez des collègues qui font de l'aérobiologie. Lors du colloque de l'ICA (Internal Congress on Aerobiology) à Parme en septembre 2018, j'ai rencontré des collègues aérobiologistes et mycologues et je pense que nous pourrions nouer des collaborations (Jon West, Rothamsted Research ; Roy Kennedy, Warwickshire College ; Rohan Kimber, SARDI).

J'aimerais également monter, avec l'aide du service de la formation permanente INRA, une école-chercheur en aérobiologie. La communauté internationale des aérobiologistes travaillant sur l'air extérieur est majoritairement représentée par chercheurs travaillant sur le pollen (constat fait lors de l'ICA 2018). Une telle école-chercheur permettrait de rassembler des collègues travaillant sur différents objets (champignons, bactéries, pollen...) avec pour objectif de partager et réfléchir ensemble sur les méthodes d'échantillonnage de l'air, la modélisation des trajectoires de masses d'air, le traçage de l'origine de l'inoculum aérien, le développement de nouveaux outils pour étudier la dissémination aérienne, entre autres.

Enfin au-delà de mon mandat de DUA, cela m'intéresserait de participer à un groupe de travail INRA national sur l'avenir d'instances telles que les CIPP et les examens de sélection professionnelle : évolution, fusion, homogénéisation avec l'IRSTEA.

Pour revenir au futur idéal, à la fin de ma carrière, j'espère que mon travail de management aura été utile à l'Institut et que mon travail de recherche aura été utile à la Société.

REFERENCES

- Alderman S.C. (2013). Survival, germination, and growth of *Epichloë typhina* and significance of leaf wounds and insects in infection of orchardgrass. *Plant Disease*, 97:323-328.
- Aldrich-Wolfe L., Travers S., Nelson Jr. B.D. (2015). Genetic variation of *Sclerotinia sclerotiorum* from multiple crops in the north central United States. *PLoS One*. Doi: 10.1371/journal.pone.0139188.
- Amato P., Parazols M., Sancelme M. et al. (2007). An important oceanic source of micro-organisms for cloud water at the Puy de Dôme. *Atmospheric Environment*, 41: 8253–8263
- Amselem J., Cuomo C.A., Van Kan J.A.L. et al. (2011). Genomic Analysis of the Necrotrophic Fungal Pathogens *Sclerotinia sclerotiorum* and *Botrytis cinerea*. *PLoS Genet* 7: e1002230.
- Boland G.J., Hall R. (1994). Index of plant hosts of *Sclerotinia sclerotiorum*. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 16, 93-108.
- Boulard T., Chave M., Fatnassi H., et al. (2008) *Botrytis cinerea* spore balance of a greenhouse rose crop. *Agric. Forest. Meteorol.* 148: 504-511
- Bowden J., Gregory P.H., Johnson C.G. (1971). Possible wind transport of coffee leaf rust across Atlantic Ocean. *Nature* 229, 500–501. doi: 10.1038/229500b0
- Brown J.K.M., Hovmoller M.S. (2002). Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease. *Science*, 297: 537–541.
- Celle-jeanton H., Travi Y., Loÿe-Pilot M.D. et al. (2009). Rainwater chemistry at a Mediterranean inland station (Avignon, France): local contribution versus long-range supply. *Atmospheric Research*, 91: 118–126.
- Clarkson J.P., Coventry E., Kitchen J., et al. (2013). Population structure of *Sclerotinia sclerotiorum* in crop and wild hosts in the UK. *Plant Pathology*, 62: 309–324.
- Clarkson J.P., Warmington R., Nordskog B. (2016). Population structure of *Sclerotinia subarctica* in England, Scotland and Norway. *Phytopathology*. 106(Suppl):139–149.
- Clarkson J.P., Warmington R., Walley P.G. (2017). Population structure of *Sclerotinia subarctica* and *Sclerotinia sclerotiorum* in England, Scotland and Norway. *Frontiers in Microbiology*, doi: 10.3389/fmicb.2017.00490
- Coley-Smith J.R. (1980). Sclerotia and other structures in survival. In : Coley-Smith JR, Verhoeff K., Jarvis W.R. (eds) *The biology of Botrytis*. 219-50. Academic Press, London UK
- Dean R., Van Kan J.A.L., Pretorius Z.A. et al. (2012). The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 13: 414-430.
- Edwards S.G., Seddon B. (2001) Selective media for the specific isolation and enumeration of *Botrytis cinerea* conidia. *Letters in Applied Microbiology*, 32: 63-66.
- Elad Y., Pertot I., Prado A.M.C., Stewart A. (2016). Plant hosts of *Botrytis* spp. p 413–486. In Elad Y., Vivier M., Fillinger S. (ed), *Botrytis, the good, the bad and the ugly*. Springer, New York, NY.
- Emmanuel C.J., Van Kan J.A.L., Shaw M.W. (2018) Differences in the gene transcription state of *Botrytis cinerea* between necrotic and symptomless infections of lettuce and *Arabidopsis thaliana*. *Plant Pathology*, 67: 1865-1873
- Ekins M.G., Aitken E.A.B., Goulter K.C. (2007). Aggressiveness among isolates of *Sclerotinia sclerotiorum* from sunflower. *Australasian Plant Pathology*, 36: 580–586.
- Fekete E., Fekete E., Irinyi L., et al. (2012). Genetic diversity of a *Botrytis cinerea* cryptic species complex in Hungary. *Microbiological Research*, 167: 283–291.
- Fournier E., Giraud T., Loiseau A., et al., (2002). Characterization of nine polymorphic microsatellite loci in the fungus *Botrytis cinerea* (Ascomycota). *Mol. Ecol. Notes*, 2 : 253–5.
- Gensollen V., Straëbler M., De Goyon B., et al. (2005). Les évolutions réglementaires dans le domaine des variétés et des semences. *Fourrages*, 182 : 237-244.

- Isard S.A., Gage S.H., Comtois P., Russo J. M. (2005). Principles of the atmospheric pathway for invasive species applied to soybean rust. *Bioscience*, 5: 851–861.
- Jarvis W.R. (1962). The dispersal of spores of *Botrytis cinerea* Fr. in a raspberry plantation. *Transactions of the British Mycological Society*, 45: 549–59.
- Johnston P.R., Hoksbergen K., Park D., Beever, R. E. (2013). Genetic diversity of *Botrytis* in New Zealand vineyards and the significance of its seasonal and regional variation. *Plant Pathology*, 63: 888–898.
- Jombart T., Devillard S., Balloux, F. (2010). Discriminant analysis of principal components: a new method for the analysis of genetically structured populations. *BMC Genetics*, 11: 94.
- Langford B., Davison B., Nemitz E., Hewitt C.N. (2009). Mixing ratios and eddy covariance flux measurements of volatile organic compounds from an urban canopy (Manchester, UK). *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 8: 245–284.
- Lindemann J., Constantinidou H.A., Barchet W.R., Upper C.D. (1982). Plant as sources of airborne bacteria, including ice nucleation-active bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 44:1059-1063.
- Lighthart B., Shaffer B.T. (1994). Bacterial flux from Chaparral into the atmosphere in mid-summer at a high desert location. *Atmospheric Environment*, 28: 1627-1274.
- Malvárez G., Carbone I., Grünwald N.J., et al. (2007). New populations of *Sclerotinia sclerotiorum* from lettuce in California and peas and lentils in Washington. *Phytopathology*, 97: 470–483.
- Maslow A.H. (1943). A theory of human motivation. *Psychological Review* 50 : 370–396.
- Meyer M., Cox J. A., Hitchings M.D.T., et al. (2017). Quantifying airborne dispersal routes of pathogens over continents to safeguard global wheat supply. *Nature Plants*, 3 : 780-786.
- Morris C.E., Bardin M., Kinkel L.L., et al. (2009). Expanding the paradigms of plant pathogen life history and evolution of parasitic fitness beyond agricultural boundaries. *PLoS Pathog.* 5:e1000693. doi: 10.1371/journal.ppat.1000693
- Moyano C., Melgarejo P. (2002). Survival of *Botrytis cinerea* in soil in South-Eastern Spain. *Journal of Phytopathology* 150: 536–40.
- Nicot P.C., Mermier M., Vaissière B.E., Lagier J. (1996). Differential spore production by *Botrytis cinerea* on agar medium and plant tissue under near-ultraviolet light-absorbing polyethylene film. *Plant Disease*, 80, 555–558.
- Plesken C., Weber R.W.S., Rupp S., et al. (2015). *Botrytis pseudocinerea* is a significant pathogen of several crop plants but susceptible to displacement by fungicide-resistant *B. cinerea* strains. *Applied and Environmental Microbiology*, 81: 7048-7056.
- Purdy L.H., Krupa S.V., Dean J.L. (1985). Introduction of sugarcane rust into the Americas and its spread to Florida. *Plant Disease*, 69, 689–693. doi: 10.1094/PD-69-689
- Rolph G., Stein A., Stunder B. (2017). Real-time environmental applications and display system: ready. *Environ. Model. Softw.* 95:210–228.
- Schardl C.L. (1996). *Epichloe* species: fungal symbionts of grasses. *Annu. Rev. Phytopatho*, 34: 109-130.
- Shaw M.W., Emmanuel C.J., Emilda D. et al. (2016). Analysis of cryptic, systemic *Botrytis* infections in symptomless hosts. *Frontiers in Plant Science*, doi: 10.3389/fpls.2016.00625
- Sirjusingh C., Kohn L.M. (2001). Characterization of microsatellites in the fungal plant pathogen, *Sclerotinia sclerotiorum*. *Molecular Ecology Notes*, 1: 267-69.
- Singh R.P., Hodson D.P., Jin Y., et al. (2015). Emergence and spread of new races of wheat stem rust fungus: continued threat to food security and prospects of genetic control. *Phytopathology* 105: 872–884.
- Sowley E.N.K., Dewey F.M., Shaw M.W. (2010). Persistent, symptomless, systemic, and seed-borne infection of lettuce by *Botrytis cinerea*. *European Journal of Plant Pathology* 126: 61-71
- Steadman J.R., Marcinkowska J., Rutledge S. (1994). A semi-selective medium for isolation of *Sclerotinia sclerotiorum*. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 16: 68-70.
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., et al. (2015). NOAA'S HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96:2059–2077.

- Tao Z.N., Malvick D., Claybrooke R., et al. (2009). Predicting the risk of soybean rust in Minnesota based on an integrated atmospheric model. *Int. J. Biometeorol.* 53: 509–521.
- Walker A.S., Gautier A., Confais J., et al. (2011). *Botrytis pseudocinerea*, a new cryptic species causing gray mold in French vineyards in sympatry with *Botrytis cinerea*. *Phytopathology*, 101: 1433–1445.
- Walker A.S., Micoud A., Rémuson F., et al. (2013). French vineyards provide information that opens ways for effective resistance management of *Botrytis cinerea* (grey mould). *Pest Management Science*, 69: 667–678.
- Walker A.S., Auclair C., Rémuson et al. (2015a). Status of resistance towards SDHIs in French populations of *Sclerotinia sclerotiorum* and characterization of resistant strains. Presented at Resistance 2015, Harpenden, UK.
- Walker A.S., Gladieux P., Decognet V., et al. (2015b). Population structure and temporal maintenance of the multihost fungal pathogen *Botrytis cinerea*: causes and implications for disease management. *Environmental Microbiology*, doi:10.1111/1462-2920.12563.

ANNEXES : quelques publications significatives

Leyronas C., Bryone F., Duffaud M., Nicot P. 2015. Assessing host specialization of *Botrytis cinerea* on lettuce and tomato by genotypic and phenotypic characterization. *Plant Pathology*, 64 : 119-127.

Leyronas C., Bardin M., Berthier K., Duffaud M., Troulet C., Villeneuve F., Torres M., Nicot P. 2018. Assessing the phenotypic and genotypic diversity of *Sclerotinia sclerotiorum* in France. *European Journal of Plant Pathology* 152 : 933-944.

Leyronas C., Nicot P.C. 2013. Monitoring viable airborne inoculum of *Botrytis cinerea* in the South-East of France over 3 years: relation with climatic parameters and the origin of air masses. *Aerobiologia* 29 : 291-299.

Leyronas C., Halkett F., Nicot P.C. 2015. Relationship between the genetic characteristics of *Botrytis* sp. airborne inoculum and meteorological parameters, seasons and the origin of air masses. *Aerobiologia*, 31 : 367-380.

Leyronas C., Morris C.E., Choufany M., Soubeyrand S. 2018. Assessing the aerial interconnectivity of distant reservoirs of *Sclerotinia sclerotiorum*. *Frontiers in Microbiology*, doi: 10.3389/fmicb.2018.02257