



Colloque de l'Académie d'agriculture de France
Santé des plantes : connaître pour protéger¹
Organisé à Toulouse les 25 et 26 novembre 2021

Conclusion

Préambule

Ce colloque organisé par l'Académie d'agriculture de France² s'est déroulé à Toulouse (amphithéâtre Toulouse Garonne), les 25 et 26 novembre 2021. Son organisation³, pilotée par Marie-Thérèse Esquerré-Tugayé, professeur émérite à l'Université Toulouse III-Paul Sabatier et membre de l'Académie d'agriculture de France, a fait intervenir plusieurs sections de l'Académie : section 6 (Sciences de la vie), section 1 (Productions végétales) et section 9 (Agrofournitures). Le colloque a réuni 113 participants, dont une forte proportion d'étudiants de Masters dans le domaine du végétal et de l'écologie à Toulouse, Montpellier, Perpignan et Nice Côte d'Azur. Ils ont été accueillis, le 25 novembre, par Marc Délos, membre de l'Académie d'agriculture de France, correspondant territorial de l'Académie pour la Région Grand Sud. Le Bureau de l'Académie était représenté par Jean-Jacques Hervé, vice-président de l'Académie. Ce premier après-midi a été clôturé par une réception à l'Hôtel Dieu de Toulouse.

Le 26 novembre, les participants ont été accueillis par Constant Lecoer, Secrétaire perpétuel de l'Académie. Après ces mots de bienvenue, Marie-Thérèse Esquerré-Tugayé a expliqué pourquoi le thème général de ce colloque organisé en Région Grand Sud (Occitanie-PACA) concernait la santé des plantes (cf. ci-dessous et Programme du colloque en Annexe 1). La Région comporte en effet plusieurs laboratoires internationalement reconnus pour leurs travaux sur les parasitismes et les symbioses des

¹ <https://santeplantes21.sciencesconf.org/index/ unauthorized>

² <https://www.academie-agriculture.fr>

³ **Comité d'organisation : Coordinatrice principale** : Marie-Thérèse Esquerré-Tugayé, professeur émérite Université Toulouse III-Paul Sabatier, Académie d'agriculture de France

Co-organisateur : André Charrier, professeur honoraire Institut Agro, Montpellier, Académie d'agriculture de France ; Marc Délos, Ingénieur, Ministère Agriculture et de l'Alimentation, DGAL, Toulouse, Académie d'agriculture de France; Michel Dron, professeur émérite Université Paris XI, Académie d'agriculture de France ; Dominique Job, directeur de recherche émérite au CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, Bayer, Lyon, Académie d'agriculture de France ; Philippe Reignault, professeur des Université ULCO, ANSES, Angers, Académie d'agriculture de France ; Alain Toppan, directeur scientifique honoraire Limagrain, Toulouse, Académie d'agriculture de France

plantes, l'environnement et l'agroécologie, et pour les formations qu'ils dispensent dans ces domaines auprès de étudiants des universités et des écoles. Marie-Thérèse Esquerré-Tugayé a chaleureusement remercié l'Académie d'agriculture de France, l'Université Toulouse III et les personnes impliquées dans l'organisation matérielle du colloque, notamment Marie-Ange Albouy et Anne-Marie Bousquet du Pôle congrès scientifiques de l'Université Toulouse III (site web et gestion), Christophe Roux du Laboratoire de Recherche en Sciences Végétales de Toulouse (soutien à l'organisation générale) et Benoît Allard de la Division informatique de l'Université Toulouse III-Paul Sabatier (gestion des présentations, enregistrement vidéo du colloque, lien Zoom avec les participants ne pouvant assister en présentiel). Elle a remercié également les sponsors du colloque, institutionnels et privés, pour leur intérêt et leur soutien généreux.

Introduction

En introduction du colloque, le 25 novembre 2021, Christophe Roux, professeur à l'Université Toulouse III-Paul Sabatier, a présenté la fédération de recherche Agrobiosciences Interactions et Biodiversité (FR AIB)⁴. Il s'agit d'une puissante fédération de recherche dans le domaine du végétal regroupant à Toulouse quatre Unités mixtes de recherche (UMR) associant le CNRS, l'INRAE, l'Université Toulouse III, l'INP-ENSAT⁵ et l'IRD, et une Unité de service (US) INRAE (CNRGV ; Centre national de ressources génomiques végétales). La fédération est un vecteur d'animation scientifique (financement de projets Inter-Unités, séminaires) et procure un soutien technologique sous forme de plateformes et plateaux techniques.

Après cette présentation impressionnante par Christophe Roux, on ne peut que s'associer au dernier avis du Hcéres (Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur) disant que la structure fédérative FR AIB joue un rôle extrêmement positif dans l'animation scientifique de la recherche en biologie végétale et en écologie dans la région toulousaine⁶. Comme nous l'avons vu lors de la présentation de Christophe Roux, la fédération a montré, depuis sa création, sa capacité à initier, soutenir et gérer des plateformes techniques mutualisées d'ampleur nationale. La FR AIB joue de plus un rôle important dans l'émergence de nouveaux projets de recherche collaboratifs, grâce au financement de projets exploratoires inter-unités, ce qui permet aux équipes, notamment aux jeunes chercheurs de concourir à des appels à projets, par exemple de l'Agence nationale de la recherche (ANR). La FR AIB a aussi joué un rôle déterminant dans la réussite du LabEx TULIP⁷, qui a ensuite construit un projet d'École Universitaire de Recherche du même nom (voir ci-dessous), qui sont des actions structurantes essentielles pour la communauté scientifique végétaliste et écologiste toulousaine. Il est clair que ces différentes actions renforcent la visibilité de cette communauté scientifique, ce qui lui permet d'apparaître comme un pôle de recherche majeur en biologie et en écologie végétale aussi bien au niveau national qu'international

Enseignements en Région Grand Sud (25 novembre)

La première session du colloque (25 novembre), animée par André Charrier, membre de l'académie d'agriculture de France et professeur émérite à Montpellier SupAgro, a été consacrée à la présentation de quelques formations universitaires en Région Grand Sud. Soulignons que la formation universitaire en Région Occitanie est forte, s'appuyant sur huit universités et trente et une écoles d'ingénieurs et écoles supérieures spécialisées. La Région compte près de 10 % des étudiants français, soit près de 260 000 étudiants. Elle compte également 15 000 chercheurs du secteur public, et 7500 doctorants. Elle occupe le 3^{ème} rang national en termes d'effectifs d'étudiants et le 4^{ème} au regard du nombre d'ingénieurs formés sur son territoire. Lors de cette première session, les présentations suivantes ont été effectuées :

⁴ <https://www.fraib.fr>

⁵ <https://www.ensat.fr/fr/index.html>

⁶ <https://www.hceres.fr/sites/default/files/media/downloads/a2021-ev-0311384l-der-sf210019203-030861-rf.pdf>

⁷ <https://www.labex-tulip.fr>; TULIP : Towards a Unified theory of biotic interactions: role of environmental Perturbations

- 1) Celle du nouveau Master de Biologie Végétale⁸ de l'Université Toulouse III- Paul Sabatier par Christophe Jacquet, professeur de cette université, et responsable de ce master.
- 2) Celle des enseignements sur la Santé des Plantes à l'Institut Agro par Claire Neema (professeure à l'Institut Agro – Montpellier SupAgro), dont le Master international « Sciences et technologie de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement » (Master 3A)⁹ et le Master européen « Santé des plantes dans les systèmes de culture durables »¹⁰.
- 3) La présentation de l'École Universitaire de Recherche (EUR) TULIP-Graduate School de Toulouse et Perpignan¹¹ et du Master international « Functional Biology and Ecology » (FBE) de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier¹² par Jean-Philippe Galaud, professeur de cette université, coordinateur de l'EUR TULIP et coresponsable du master FBE.
- 4) La présentation du Master BOOST « Le biocontrôle pour la santé des plantes » de l'Université Côte d'Azur¹³ par Nicolas Pauly, maître de conférence de cette université. Il s'agit d'un programme de formation unique en France centré sur l'enseignement des approches de biocontrôle. Il s'appuie sur le savoir-faire et l'expertise nationale de l'Institut Sophia Agrobiotech¹⁴ dans le domaine de la santé des plantes.

Cette session a été très appréciée, très animée et a suscité de nombreuses questions de l'auditoire. Anne-Marie Hattenberger, membre de l'Académie d'agriculture de France, a fait part de l'attention et du soutien portés par l'Académie aux enseignements et à leurs étudiants.

Les Plateformes technologiques en Région Occitanie (25 novembre)

Comme l'a précisé Christophe Roux lors de la présentation de la fédération de recherche AIB, l'une des missions de cette fédération est précisément de favoriser l'essor de diverses plateformes (imagerie, protéomique, génomique, phénotypage).

Depuis la création de la FR, ces plateformes ont été à l'origine de très nombreuses publications (plus de 300 en 2020). On peut noter, dans le cadre de ce colloque, le travail récent publié en juillet 2021 dans *Annals of Botany PLANTS* de Marie-Thérèse Esquerré-Tugayé, organisatrice principale de ce colloque, membre de l'Académie d'agriculture de France. Son équipe a permis de dévoiler par imagerie chimique et de fluorescence le profil en composants phénoliques de la violette, plante emblématique de Toulouse¹⁵.

Les plateformes suivantes ont été présentées.

- 1) La plateforme de phénotypage des maladies du bois de la vigne¹⁶ par Jean-Luc Verdeil, directeur de recherche au CIRAD à Montpellier et responsable scientifique de cette plateforme. Le but est de réaliser un phénotypage anatomique des maladies de dépérissement chez la vigne, de manière non destructive, notamment par l'utilisation d'approches d'imagerie 3D (RMN, tomographie aux rayons X), associées à un traitement par *Machine Learning*. Ces maladies affectent 80 % du vignoble français. De manière convaincante, des appareillages transportables au champ ont été réalisés et présentés.

⁸ <https://docplayer.fr/75904555-Master-de-biologie-vegetale-universite-toulouse-iii-paul-sabatier-responsable-christophe-jacquet.html>

⁹ <https://www.montpellier-supagro.fr/master3A>

¹⁰ <https://www.montpellier-supagro.fr/formations/catalogue-des-formations/recherche-d-une-formation/master-europeen-planthealth>

¹¹ <https://www.labex-tulip.fr/La-Graduate-School/Le-Master-TULIP-GS>

¹² https://www6.inrae.fr/labex-tulip_eng/News/The-Master-in-Functional-Biology-and-Ecology-begins

¹³ <https://univ-cotedazur.fr/formation/offre-de-formation/diplome-detablissement-en-biocontrrole-pour-la-sante-des-plantes>

¹⁴ <https://www6.paca.inrae.fr/institut-sophia-agrobiotech>

¹⁵ M. Khatib, C. Pouzet, C. Lafitte, J. Chervin, V. Bonzon-Ponnet, A. Jauneau, M.-T. Esquerré-Tugayé (2021) Phenolic profile of a Parma violet unveiled by chemical and fluorescence imaging. *AoB PLANTS* **13**, plab041, <https://doi.org/10.1093/aobpla/plab041>

¹⁶ https://www.plan-deperissement-vigne.fr/sites/default/files/Fiche_Vitimage_VF.PDF

- 2) La plateforme de phénotypage RhizOSun de l'interaction entre le tournesol et la plante parasite Orobanche pour l'identification de nouvelles résistances par Mireille Chabaud, ingénieure de recherche à INRAE - Toulouse. Le phénotypage, portant sur la détection des nodules sur les racines, a été optimisé par l'utilisation de rhizotrons (boîtes en plexiglas transparent) placés en enceinte en conditions contrôlées. Ces travaux de phénotypage ont fait l'objet d'un article dans *Plant Methods* en août 2021¹⁷.
- 3) Enfin, le modèle IPSIM (Injury Profile SIMulator)¹⁸, une plateforme de modélisation, a été présenté par Marie-Hélène Robin, enseignante-chercheuse à l'école d'ingénieurs de Purpan - Toulouse INP¹⁹. Cette plateforme a été développée pour établir des liens entre pratiques culturales et populations de bioagresseurs dans une situation de production donnée. On l'a vu sur l'une des diapositives de Marie-Hélène Robin, le modèle IPSIM a été appliqué à différentes cultures : blé et tournesol par exemple. Il a également été appliqué à une plante déclarée nuisible en France, le chardon des champs. Ces derniers résultats ont fait l'objet d'une publication récente dans *Frontiers in Agronomy*²⁰. La plateforme de modélisation est opérationnelle et permet aux agriculteurs, aux techniciens et aux chercheurs d'identifier les causes d'une augmentation des infestations.

En conclusion de cette session sur les plateformes de phénotypage, il est clair que la Région a su mettre en place avec succès plusieurs plateformes dans le secteur des maladies des plantes. Elles ont probablement bénéficié de l'apport important du projet PHENOME²¹, supporté par les Investissements d'Avenir dans le cadre de Infrastructures Nationales en Biologie et Santé, projet coordonné par François Tardieu du LEPSE à Montpellier et qui a débuté vers 2015. Ce projet visait à doter la France d'infrastructures capables de mesurer les caractères agronomiques des plantes et les conditions environnementales avec des méthodes précises et à haut débit.

Sachant que nombre de ces plateformes se basent sur l'imagerie et l'apprentissage automatique, il serait utile d'utiliser ces images, vidéos, logiciels de modélisation pour développer des outils de visualisation des phénotypes basés sur les approches de réalité virtuelle. De tels dispositifs, utilisables par les sélectionneurs, sont d'ores et déjà développés en Norvège, aux Pays-Bas et en Allemagne.

Maladies des plantes (session 1, 26 novembre)

La première session du vendredi 26 novembre a été consacrée aux maladies des plantes et a été animée par Michel Dron, professeur émérite à l'Université Paris-Saclay et membre de l'Académie d'agriculture de France.

Le premier exposé a été la conférence plénière de Sophien Kamoun, directeur du laboratoire Sainsbury et professeur à l'Université d'East Anglia à Norwich (UK). Sophien Kamoun est également membre de la *Royal society*, l'équivalent de l'Académie des sciences en France, et il est membre associé de l'Académie d'agriculture de France. La conférence a porté sur le système immunitaire développé par les plantes pour lutter contre l'invasion par des agents pathogènes et, en parallèle sur le contournement de ces défenses par les pathogènes.

Après une introduction très pédagogique sur l'immunité des plantes, Sophien Kamoun a consacré son exposé à des protéine particulières de plantes, les NLRs (*Nucleotide-binding Leucine-rich repeat (NLR)*)

¹⁷ A. Le Ru, G. Ibarcq, M.- C. Boniface, A. Baussart, S. Muñoz, M. Chabaud (2021) Image analysis for the automatic phenotyping of *Orobanche cumana* tubercles on sunflower roots. *Plant Methods* **17**, 80, <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00779-6>

¹⁸ http://www.modelia.org/moodle/pluginfile.php/2306/mod_resource/content/0/08_IPSIM_ModPIC2015_Aubertot.pdf

¹⁹ <https://www.purpan.fr>

²⁰ O. Lacroix, J.-N. Aubertot, M. Bohanec, S. Cordeau, DC Corrales, M.-H. Robin (2021) IPSIM-Cirsium, a qualitative expert-based model to predict infestations of *Cirsium arvense*. *Frontiers in Agronomy*. **3**, 655383, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fagro.2021.655383/full>

²¹ https://cache.media.enseignementsup-recherche.gouv.fr/file/Infrastructures_2/97/3/PHENOME_206973.pdf

receptors). Il a présenté une stratégie développée dans son laboratoire, nommée EvoMPMI²² qui porte sur l'évolution de l'immunité des plantes ou comment l'évolution a transformé il y a environ 100 millions d'années les complexes binaires « Senseur » et « Exécuteur » des NLRs en de véritables réseaux protéiques, faisant intervenir différents senseurs et exécuteurs redondants, ce qui permet d'augmenter la robustesse du système immunitaire des plantes et de contrer l'action des effecteurs pathogènes²³. Plus récemment, ces chercheurs ont prolongé cette étude et montré que les pathogènes ont évolué de manière convergente aux plantes afin de sécréter des effecteurs capables de cibler les réseaux de NLRs en interagissant avec les NLRs exécuteurs. Ces travaux permettent de mieux comprendre les mécanismes d'immunité des plantes déclenchée par effecteur, l'ETI (*Effector-triggered immunity*). Les résultats ont été publiés dans *PLoS Biology* en septembre 2021²⁴. Le message à retenir est que comprendre cette évolution est très important pour comprendre le système immunitaire des plantes.

Dans la dernière partie de sa conférence, Sophien Kamoun a présenté une nouvelle approche dans son laboratoire et qui consiste à coupler des NLRs à des anticorps particuliers, nommés *nanobodies* (nanocorps en français) et qui sont des anticorps simple chaîne à domaine unique. Cela abouti à la création d'un nouvel outil, les *PIKobodies* dont la preuve de concept a été apportée par utilisation d'anticorps reconnaissant des protéines fluorescentes telles la GFP (*Green Fluorescent Protein*)²⁵. Cette conférence passionnante a permis de montrer que tous ces résultats enrichissent considérablement nos connaissances sur ces systèmes complexes impliqués dans l'immunité des plantes mais qu'ils voient également le développement d'applications pour la sélection variétale afin de produire des gènes de résistance sur mesure, pyramidables, et d'augmenter la résistance des plantes cultivées aux pathogènes.

La deuxième conférence de cette session a été donnée par Paola Bonfante, professeure émérite à l'Université de Turin, membre de l'Académie européenne des sciences et membre associé de l'Académie d'agriculture de France. Sa conférence a porté sur l'interaction étroite qui existe entre les plantes et leur microbiote en relation avec l'identité des principaux facteurs qui déterminent la structure, la diversité et la fonction du microbiote dans le sol, dans la rhizosphère et dans les organes des plantes. Elle s'est plus particulièrement intéressée aux champignons mycorhiziens à arbuscules, un groupe de champignons du sol, qui établissent une interaction symbiotique avec plus de 70 % des plantes terrestres. Un article de revue de son équipe est à paraître sur ces questions en février 2022 dans *Current Opinion in Microbiology*²⁶.

Cette présentation fut remarquable sur plusieurs points :

- 1) Elle fut très pédagogique, passant de la description d'exemples à un seul pathogène et un seul microorganisme bénéfique à des exemples où l'ensemble du microbiote intervient dans la réponse de la plante pour contrer l'action des pathogènes.

²² J.L. Upson, E.K. Zess, A. Białas, C.H. Wu, S. Kamoun S (2018) The coming of age of EvoMPMI: evolutionary molecular plant-microbe interactions across multiple timescales. *Current Opinion in Plant Biology* **44**, 108-116, <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2018.03.003>

²³ H. Adachi, L. Derevnina, S. Kamoun (2019) NLR singletons, pairs, and networks: evolution, assembly, and regulation of the intracellular immunoreceptor circuitry of plants. *Current Opinion in Plant Biology* **50**, 121-131, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31154077/>

²⁴ L. Derevnina, M.P. Contreras, H. Adachi, J. Upson, A. Vergara Cruces, R. Xie, J. Sktenar, F.L.H. Menke, S.T. Mugford, D. MacLean, W. Ma, S.A. Hogenhout, A. Goverse, A. Maqbool, Ch.-H. Wu, S. Kamoun (2021) Plant pathogens convergently evolved to counteract redundant nodes of an NLR immune receptor network. *PLoS Biology* **19**, e3001136, <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001136>

²⁵ J. Kourelis, C. Marchal, S. Kamoun (2021) NLR immune receptor-nanobody fusions confer plant disease resistance. *BioRxiv*, doi: <https://doi.org/10.1101/2021.10.24.465418>

²⁶ M. Chialva, L. Lanfranco, P. Bonfante (2022) The plant microbiota: composition, functions, and engineering. *Current Opinion in Biotechnology* **73**, 135-142, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958166921001154?via%3Dihub>

- 2) Elle a permis de parfaitement illustrer combien les plantes et leur environnement s'intègrent dans le concept *One Health* afin de procurer une alimentation saine aux hommes et aux animaux²⁷.
- 3) Sur la base des travaux sur le microbiote intestinal, elle démontre bien qu'il faut étendre la notion d'hobionte aux plantes, ce qui complique et enrichi la notion d'organisme vivant.
- 4) Un autre aspect concerne l'utilisation du microbiote des plantes et des communautés microbiennes synthétiques²⁸ en agriculture, communautés synthétiques qui pourront être définies à partir de l'analyse approfondie des microbiotes, par exemple par des approches de métagénomique.
- 5) Enfin, un dernier aspect concerne un nouveau regard porté sur les sols suppressifs de maladies grâce à la connaissance des microorganismes qui les composent.

La troisième conférence sur les maladies des plantes a été donnée par Isabelle Oswald, directrice de recherche INRAE à Toulouse et membre de l'Académie d'agriculture de France, et par Olivier Puel, ingénieur de recherche INRAE à Toulouse. La présentation a porté sur les mycotoxines qui ont principalement été étudiées en regard des nombreuses pathologies humaines et animales qu'elles causent²⁹. L'exposé a permis de faire le point sur un élément original qui concerne le rôle physiologique de ces mycotoxines. Les résultats présentés montrent que certaines mycotoxines, par exemple la patuline et la citrinine, interviennent pour aider les champignons les produisant à coloniser les plantes hôtes. Elles agissent donc comme des facteurs de virulence ou d'agressivité.

Les conférenciers ont présenté trois challenges pour les recherches futures :

- 1) Les nouvelles mycotoxines et leur toxicité
- 2) Les co-contaminations mycotoxiques
- 3) L'influence du changement climatique sur le développement de champignons produisant des mycotoxines.

Une question est d'actualité : en effet, dans le contexte des discussions sur le remplacement des produits animaux par des produits végétaux, qu'en est-il de la potentialité d'une plus grande exposition aux mycotoxines ? Sachant que les mycotoxines affectent environ 70 % des cultures dans le monde, et que l'homme est principalement contaminé par les végétaux, doit-on s'inquiéter du fait qu'un régime à base de plantes puisse nous exposer à quelque chose de dangereux au lieu d'être utile ?

Maladies des plantes (session 2, 26 novembre)

La deuxième session sur les maladies a été animée le matin du 26 novembre par Alain Toppan, ancien directeur général de Biogemma et membre de l'Académie d'agriculture de France.

La première présentation s'intitulait : « Apport des études de génétique d'association pangénomiques (GWAS ; *Genome Wide Association Study*) pour l'étude de la résistance aux maladies » et fut présentée par Christophe Jacquet, professeur à l'Université de Toulouse III-Paul Sabatier. Cette présentation a illustré de manière très claire comment la GWAS peut être mise en œuvre chez la légumineuse modèle *Medicago truncatula* comme une approche alternative ou complémentaire à la cartographie de QTL, grâce à une quantité massive de marqueurs SNP dans le génome de cette plante³⁰. Ainsi, l'analyse d'une collection de quelques 180 lignées de *Medicago* a permis d'identifier des régions du génome

²⁷ <https://www.anses.fr/fr/content/one-health>

²⁸ O. Marín, B. González, M.J. Poupin (2021) From microbial dynamics to functionality in the rhizosphere: a systematic review of the opportunities with synthetic microbial communities. *Frontiers in Plant Science* **12**, 843, <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2021.650609>

²⁹ T. Hautbergue, E. L. Jamin, L. Debrauwer, O. Puel, I. P. Oswald (2018) From genomics to metabolomics, moving toward an integrated strategy for the discovery of fungal secondary metabolites. *Natural Product Report* **35**, 147-173, DOI <https://doi.org/10.1039/C7NP00032D>

³⁰ M. Bonhomme, C. Jacquet (2019) Genome-wide association mapping and population genomic features in *Medicago truncatula*. In *The Model Legume Medicago truncatula* (Frans de Bruijn, Ed.), Wiley On Line Library, pp.870-881, <https://doi.org/10.1002/9781119409144.ch109>

impliquées dans la résistance à deux oomycètes. Dans le cas de différentes souches d'*Aphanomyces euteiches*, oomycète responsable du pourrissement des racines de plantes légumineuses, cela a permis d'identifier des régions de résistance communes ou souche-spécifiques, utilisables dans des programmes d'amélioration végétale. Une analyse GWAS avec *Phytophthora palmivora*, un oomycète qui infecte un certain nombre de cultures commerciales tropicales mais qui peut également coloniser *Medicago truncatula*, a notamment détecté le rôle du facteur de transcription RAD1 (REQUIRED FOR ARBUSCULE DEVELOPMENT1) dans la sensibilité à la maladie, ce facteur étant par ailleurs connu pour son action dans la compatibilité d'interaction avec un champignon mycorhizien³¹. On le voit, des applications sont possibles en sélection végétale grâce à la manipulation de ces gènes. Il faut espérer que de futurs travaux permettront d'étendre les résultats obtenus chez des plantes modèles à des plantes d'intérêt agronomique.

L'exposé suivant par Élisabeth Fournier, directrice de recherche INRAE à l'Institut des plantes de Montpellier, a porté sur les terrasses rizicoles de la Région du Yunnan dans le sud-ouest de la Chine. Les travaux présentés font suite à la découverte, il y a quelques années, notamment par l'équipe de Jean-Benoît Morel à Montpellier et d'équipes chinoises que la coculture de génotypes différents de riz dans la région du Yunnan conférait une résistance durable contre la pyriculariose du riz causée par *Pyricularia oryzae*³². Ces chercheurs avaient estimé que, dans les terrasses, il fallait maintenir une vingtaine de gènes de résistance différents, ce que confirme les résultats d'Élisabeth Fournier. Elle montre de plus que l'introduction récente dans la zone d'une variété moderne de riz, la variété Hongyang, provoque localement des déclin importants de la diversité des cultures, dont elle a mesuré les conséquences sur la structure de la population du pathogène. Le résultat est que les isolats de Hongyang sont significativement plus virulents que ceux trouvés dans les terrasses cultivées avec des variétés traditionnelles de riz et qu'il y a émergence de *Pyricularia* adaptés.

Comment transposer ces résultats en France et sur d'autres cultures que le riz ? INRAE a beaucoup travaillé sur ce concept. Notamment grâce à plusieurs travaux montrant l'intérêt des mélanges variétaux comme une méthode de lutte contre les maladies des cultures. Mentionnons au passage, la présence lors de ce colloque de Claude Pope, directrice de recherche honoraire INRAE et membre de l'Académie d'agriculture, qui a beaucoup travaillé sur ces questions³³. Ce concept de mélanges variétaux a également été testé chez le blé dans le cadre de l'ANR Wheatamix³⁴. Ce projet a, en particulier, permis d'élaborer un outil pour l'optimisation des associations variétales. Signalons enfin qu'un industriel, le groupe Soufflet, commercialise depuis un an environ, des mélanges de variétés de blé répondant aux attentes de la meunerie³⁵.

Agents microbiens de biocontrôle (26 novembre)

La première session de ce début d'après-midi du 26 novembre a été consacrée aux agents microbiens de biocontrôle. Elle a été animée par Philippe Reignault, directeur de la Santé des végétaux à l'ANSES et membre de l'Académie d'agriculture de France.

Cette session a comporté deux exposés. Au cours du premier, Marc Bardin, directeur de recherche INRAE à Avignon, a d'abord fait une présentation générale des agents microbiens de biocontrôle des maladies des plantes, montrant leurs apports et leurs limitations. Il a insisté sur la nécessité de

³¹ A.M. MacLean, A. Bravo, M.J. Harrison (2017) Plant signaling and metabolic pathways enabling arbuscular mycorrhizal symbiosis; *The Plant Cell* **29**, 2319–2335, <https://doi.org/10.1105/tpc.17.00555>

³² J. Liao, H. Huang, I. Meusnier, H. Adreit, A. Ducasse, F. Bonnot, Lei Pan, X. He, T. Kroj, E. Fournier, D. Tharreau, P. Gladieux, J.-B. Morel (2016) Pathogen effectors and plant immunity determine specialization of the blast fungus to rice subspecies. *eLife* **2016**;5:e19377, <https://doi.org/10.7554/eLife.19377.001>

³³ C. Urvoy (2021) Claude Pope, une vie consacrée aux mélanges variétaux. *Phytoma* **740**, 44-45, <https://www.academie-agriculture.fr/sites/default/files/agenda/20210118articlesurclaudepope.pdf>

³⁴ <https://www6.inrae.fr/wheatamix>

³⁵ <https://www.latoque.fr/une-premiere-en-meunerie-soufflet-lance-un-melange-de-varietes-de-ble-pret-asemer-1,0,442722038.html>

connaître leur mode d'action afin de cerner les facteurs clés de leur efficacité. L'optimisation du microbiote des plantes pour leur santé et leur nutrition a ensuite été présentée par Thomas Rey, responsable des programmes de recherche BioSolutions chez la société De Sangosse. Cette société est un acteur international basé à Angers et à Toulouse, de la protection des cultures, de la nutrition des plantes, et du contrôle des nuisibles. D'emblée, ces deux exposés nous ont ramené aux deux conférences de ce matin données par Paola Bonfante et Sophien Kamoun.

Le secteur du biocontrôle est très actif en France, tant du côté du secteur public que du secteur privé. On peut citer par exemple le consortium public-privé Biocontrôle³⁶ qui associe divers acteurs publics tels INRAE, AgroSup Montpellier ou l'Université Côte d'Azur et des entreprises telles BASF, Bayer, Syngenta ou De Sangosse. Un autre exemple est le réseau IBMA France³⁷, qui est l'association française des entreprises de produits de biocontrôle et qui fédère une quarantaine de membres représentant 90 % du marché du biocontrôle en France. Ce marché, en constante progression, est en France de l'ordre de 250 millions d'euros soit de l'ordre de 12 % du marché de la protection des plantes. Cela témoigne du succès rencontré par les solutions de biocontrôle auprès des agriculteurs et dont de nombreuses sont aujourd'hui commercialisées. Il reste cependant des questions à aborder :

- 1) En termes de limitations, il est probablement aussi difficile de débusquer de nouvelles souches microbiennes utilisables en biocontrôle que de découvrir de nouvelles molécules chimiques utilisables en protection des cultures.
- 2) Quel serait l'impact potentiel au niveau environnemental de ces communautés microbiennes délibérément introduites ? Se pourrait-il qu'elles finissent à terme par se comporter comme des communautés envahissantes, un peu à l'image de ce qui a été observé avec certains organismes introduits tels que les coccinelles asiatiques ?
- 3) Ces solutions de biocontrôle seront-elles durables ? En d'autres termes pourraient-elles être contournées par les pathogènes des cultures ? Comme l'a souligné Marie-Thérèse Esquerré-Tugayé, quelle est la pérennité de ces microorganismes introduits dans les sols ?

Enfin, il convient de saluer l'initiative de la société De Sangosse d'avoir répondu à l'appel à projets LabCom de l'ANR³⁸ en créant le Laboratoire Commun BioPlantProducts³⁹ qui associe De Sangosse, deux universités toulousaines, le CNRS et l'INP de Toulouse. Outre les transferts technologiques, ces structures permettent le recrutement de jeunes chercheurs en formation et de chercheurs confirmés au sein des entreprises.

Cet après-midi s'est poursuivi par une session consacrée aux symbioses, animée par Michel Delseny, directeur de recherche émérite au CNRS et membre de l'Académie des sciences. Deux exposés ont été présentés. L'un par Pierre-Marc Delaux, directeur de recherche CNRS à Toulouse, sur l'évolution des symbioses racinaires, l'autre par Philippe Remigi, chargé de recherche au CNRS-Toulouse, sur l'évolution expérimentale de nouveaux symbiotes de légumineuses. Rappelons-nous d'abord qu'il y a à Toulouse une longue tradition de recherche sur les interactions plantes-microorganismes, notamment en lien avec la découverte et la caractérisation des facteurs Nod et Myc par les équipes CNRS-INRA-Université de Toulouse de Jean Dénarié, directeur de recherche émérite à l'INRA et membre de l'Académie des sciences, de Guillaume Bécard, professeur à l'Université Toulouse III-Paul Sabatier et de Véréna Poinot, directrice de recherche CNRS à Toulouse. Ces travaux ont laissé une trace forte et manifestement servent de terreau aux découvertes de demain.

Pierre-Marc Delaux et son équipe s'intéressent à l'origine des interactions bénéfiques entre les plantes et leur microbiote, et aux changements génétiques permettant leur apparition et leur perte au cours de l'évolution. Ces travaux, rendus possibles par le séquençage de nouveaux génomes de plantes et leur comparaison, ouvrent la voie au développement de nouvelles symbioses par biologie de synthèse. Ils ont été récompensés par la Médaille de bronze du CNRS attribuée à Pierre-Marc Delaux en 2019.

³⁶ <https://www6.inrae.fr/consortium-biocontrrole>

³⁷ <https://www.ibmafrance.com>

³⁸ <https://anr.fr/fileadmin/aap/2021/aap-labcom-2021.pdf>

³⁹ <https://www.fraib.fr/Actualites/Le-Laboratoire-commun-BioPlantProducts-LRSV-DE-SANGOSSE>

Ce chercheur a également été lauréat 2020 de l'ERC Consolidator⁴⁰. Il a présenté des résultats passionnants sur la production d'acides gras chez les plantes nécessaire pour nourrir les champignons symbiotiques⁴¹. L'un des buts de ces chercheurs est, en se basant sur l'évolution des symbioses racinaires établies depuis près de 450 millions d'années, de créer cette symbiose avec des plantes non légumineuses mais ayant un intérêt agronomique comme le blé, le maïs ou le riz. Un article de l'équipe de Pierre-Marc Delaux a été publié sur cette question dans la revue *Science* en février 2021⁴². C'est un domaine de recherche en plein essor notamment via les technologies de biologie de synthèse, qui permettent le transfert des gènes *nif*, par ex les gènes codant la nitrogénase, chez les céréales, plus particulièrement dans les chloroplastes et les mitochondries⁴³.

Philippe Remigi et son équipe s'intéressent à l'évolution des bactéries fixatrices d'azote. Ils ont pour cela mis en place un projet d'évolution expérimentale qui vise à convertir une bactérie non symbiotique *Ralstonia solanacearum* en symbiote de légumineuse puis à soumettre le proto-rhizobium à des cycles de nodulation en présence d'une légumineuse, le mimosa⁴⁴. Cette expérience a validé un scénario d'évolution en deux étapes d'acquisition de gènes symbiotiques clés suivie d'un remodelage du génome sous sélection végétale. L'évolution expérimentale a donc fourni de nouvelles informations sur la biologie et l'évolution des rhizobia.

Finalement, il apparaît que, grâce à ces travaux brillants, les lignes ont bougé et que l'on peut espérer arriver un jour prochain à faire de la fixation symbiotique de l'azote chez des plantes non légumineuses.

Protection Agroécologique des Cultures (26 novembre)

La dernière conférence de ce colloque a porté sur la protection agroécologique des cultures par Jean-Noël Aubertot, directeur de recherche INRAE à Toulouse.

Selon la définition du dictionnaire d'agroécologie proposée par Jean-Noël Aubertot, cette Protection AgroEcologique des Cultures (PAEC) est la déclinaison des principes de l'agroécologie à la protection des cultures⁴⁵. L'un des enjeux est la réduction de l'usage des pesticides, tant en quantité par traitement qu'en nombre de traitements par année. La PAEC vise à favoriser le fonctionnement écologique des agroécosystèmes, en optimisant directement ou indirectement les interactions entre les communautés vivantes (végétales, animales et microbiennes) aussi bien dans le sol qu'au-dessus du sol. La santé du sol et la biodiversité des agroécosystèmes sont les deux axes directeurs de la PAEC. Nous avons vu dans différents exposés précédents l'importance du (des) microbiote(s) des plantes dans la protection des cultures contre les maladies et pour favoriser la croissance des plantes.

En revanche, on n'avait pas abordé lors de ce colloque la question de la réduction de l'usage des pesticides et il convient de remercier Jean-Noël Aubertot de l'avoir fait. Il est utile de mentionner ici les travaux de l'équipe de Nicolas Munier-Jolain de l'UMR Agroécologie de Dijon, publiés dans *Nature Plants*⁴⁶, montrant que la plupart des fermes du réseau DEPHY du plan Ecophyto⁴⁷ qu'ils ont analysées pourraient réduire très significativement l'usage des pesticides, sans perte notable de rendement.

⁴⁰ <https://erc.europa.eu/funding/consolidator-grants>

⁴¹ A. Keymer, P. Pimprikar, V. Wewer, C. Huber, M. Brands, S.L. Bucerius, P.M. Delaux, V. Klingl, E.V. Röpenack-Lahaye, T.L. Wang, W. Eisenreich, P. Dörmann, M. Parniske, C. Gutjahr (2017) Lipid transfer from plants to arbuscular mycorrhiza fungi. *Elife*.**6**, e29107, <https://doi.org/10.7554/eLife.29107.017>

⁴² P.M. Delaux, S. Schornack (2021) Plant evolution driven by interactions with symbiotic and pathogenic microbes. *Science* **371**, :eaba6605, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33602828/>

⁴³ N. Xiang, C. Guo, J. Liu, H. Xu, R. Dixon, J. Yang, Y.-P. Wang (2020) Using synthetic biology to overcome barriers to stable expression of nitrogenase in eukaryotic organelle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* **117**, 16537-16545, <https://doi.org/10.1073/pnas.2002307117>

⁴⁴ P. Remigi, J. Zhu, J.P.W. Young, C. Masson-Boivin (2016) Symbiosis within symbiosis: evolving nitrogen-fixing legume symbionts. *Trends in Microbiology* **24**, 63-75, <https://doi.org/10.1016/j.tim.2015.10.007>

⁴⁵ <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/protection-agroecologique-des-cultures/>

⁴⁶ M. Lechenet., F. Dessaint, G. Py, D. Makowski, N. Munier-Jolain (2017) Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants* **3**, 17008, <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.8>

⁴⁷ <https://ecophytopic.fr/dephy/carte-interactive-dephy>

En conclusion générale, cinq enseignements forts de ce colloque sur la santé des plantes sont à souligner :

- 1) La présence des étudiants, l'implication des enseignants et formations et donc le souci de la transmission intergénérationnelle.
- 2) La forte avancée des connaissances fondamentales sur les interactions plantes-microorganismes bénéfiques ou pathogènes.
- 3) Le fait que les plantes sont inséparables de leurs microbiotes et forment des holobiontes, ce qui change radicalement notre manière de penser.
- 4) L'importance de nouvelles pratiques culturales : biocontrôle, agroécologie.
- 5) Le fait que le végétal fait partie de la Santé globale *One Health*, en accord avec les enseignements du groupe de travail *One Health* de l'Académie montrant que la santé des plantes en est bien une composante. Il est clair que passer d'un concept - *One Health* - à la démonstration de sa faisabilité, requiert autre chose que des généralités. Encore et toujours, il faut toute la curiosité dont se nourrit la recherche.

« Le dynamisme de la recherche est une garantie nécessaire de l'avenir...JC. Pecker »

Rédacteur*

Dominique Job

Membre de l'Académie d'agriculture de France

Directeur de recherche émérite au CNRS

Laboratoire de Microbiologie, Adaptation et Pathogénie

UMR 5240 CNRS / Université Claude Bernard Lyon 1 / INSA / Bayer CropScience, Lyon

****Avec la contribution de Marie-Thérèse Esquerré-Tugayé***



Annexe 1 Programme du colloque

Jeudi 25 novembre 14h-18h

(Amphithéâtre Toulouse-Garonne, 11, Bd des Récollets, Toulouse)

- 14h** **Accueil et introduction** par le Bureau de l'AAF
- 14h15** **Présentation de la Fédération de Recherche FR-AIB**, Christophe Roux (Directeur)
- 14h40 –16H05** **Présentation des enseignements sur la Santé des plantes**, Modérateur André Charrier
 Christophe Jacquet (Toulouse)
 Claire Neema (Montpellier)
 Jean-Philippe Galaud (Toulouse)
 Nicolas Pauly (Nice)
- 15h30-15h45** Questions avec la salle

15h45-16h05 Pause

- 16h05** **Apports de l'imagerie, du phénotypage, et de la modélisation pour la santé des plantes**, Modératrice Cécile Pouzet
- 16h15** Le phénotypage des maladies du bois de la vigne / Jean-Luc Verdeil (Montpellier)
- 16h35** Le phénotypage de l'interaction Tournesol-Orobanche / Mireille Chabaud (Toulouse)
- 16h55** Modélisation de l'approche intégrée de la protection des plantes / Marie-Hélène Robin (Toulouse)
- 17h15-17h30** Questions avec la salle

17h40 **Départ pour la réception à l'hôtel Dieu de Toulouse (18h30-20h)**

Vendredi 26 novembre 8h30-18h

(Amphithéâtre Toulouse-Garonne, 11, Bd des Récollets, Toulouse)

8h30 **Accueil et ouverture à l'Amphi Toulouse Garonne** par Marie-Thérèse Esquerré-Tugayé

8h45-12h **Les maladies**, Modérateur Michel Dron

9h La résistance et son contournement / Sophien Kamoun (membre associé AAF, Norwich)

9h30 Les microorganismes amis ou ennemis / 2 exemples

9h30 Plant Microbiota: the impact of beneficial microbes on the root-shoot axis / Paola Bonfante (membre associée AAF, Turin)

10h Les mycotoxines / Isabelle Oswald (membre correspondant AAF Toulouse) et Olivier Puel

10h20-10h35 Questions avec la salle

10h35-11h **Pause**

11h- 12h **Les maladies (suite)**, Modérateur Alain Toppan

11h05 L'apport de la GWAS pour l'étude de la résistance aux maladies / Christophe Jacquet et Maxime Bonhomme (Toulouse)

11h25 Les terrasses rizicoles du Yuanyang : un cas exceptionnel de gestion durable des maladies / Élisabeth Fournier (Montpellier)

11h45-12h Questions avec la salle

12h-13h30 **Buffet**

13h30-14h20 **Biocontrôle et biofertilisation**, Modérateur Philippe Reignault

13h40 Agents microbiens de biocontrôle / Marc Bardin (Monfavet)

14h Un exemple de collaboration public-privé / Soc. DE SANGOSSE (Agen-Toulouse)

14h20 Questions avec la salle

14h40-15h **Pause**

15h – 15h50 **Les symbioses**, Modérateur Michel Delseny - Académie des sciences

15h10 Évolution des symbioses racinaires / Pierre-Marc Delaux (Toulouse)

15h30 Ingénierie des microorganismes / Philippe Remigi et Catherine Masson (Toulouse)

15h50 -16h10 Questions avec la salle

16h10 –16h40 **Santé des plantes (suite)**, Modérateur Michel Dron

16h10 Protection agroécologique des cultures / Jean Noël Aubertot (Toulouse)

16h40 – 16h50 Questions avec la salle

17h **Conclusion** / Dominique Job