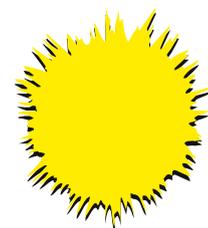


A3 Magazine

Rayonnement du CNRS



N° 76 - Printemps 2021



La santé des plantes



Magazine des anciens et amis du CNRS

A3 Magazine - Rayonnement du CNRS - Prix : 8 €

A3 Magazine - ISSN 1953-6542

Directrice de la publication : Liliane Gorrichon

Rédactrice en chef : Véronique Machelon

Editrice : Vivienne Gianinazzi-Pearson

Maquette et mise en page : Bernard Dupuis

Comité de rédaction :

Fabrice Bonardi, Martine Carisey, Daniel Charnay, Jacques Couderc, Bernard Dupuis, Alain Foucault, Vivienne Gianinazzi-Pearson, Paul Gille, Christian Girault, Liliane Gorrichon, Evelyne Jautrou, Marie-Françoise Lafon, Edmond Lisle, Véronique Machelon, Dominique Simon.

Remerciements aux contributeurs de ce numéro 76

Francis Andreux, Giulia Bogliolo Bruna, Paul-André Calatayud, Jean-Patrick Connerade, Jacques Couderc, Damien Deldicque, Marie Laure Desprez-Loustau, André Fougeroux, Bernard Fritig, Silvio Gianinazzi, Paul Gille, Liliane Gomet, Liliane Gorrichon, Christian Hily, Marie-Françoise Lafon, Jean-Claude Lehmann, Edmond Lisle, Fabrice Martin-Laurent, Georges Pelletier, André Perrin, Christiane Perrin, Françoise Petter, Anne-Marie Pillet-Schwartz, Jean-Noël Rouzaud, Yvan Segui, Marc-André Selosse, Dominique Simon, Muriel Suffert, Pascale Zanéboni

La raison d'être de l'Association des Anciens et Amis du CNRS

L'Association a été créée en 1990, dans le but de maintenir des échanges entre anciens et amis du CNRS, pour conserver un lien avec le CNRS, et pour continuer à œuvrer à son rayonnement.

Ainsi, pour répondre à la première de ces missions et maintenir ces liens, L'Association offre aux adhérents de nombreuses occasions de communiquer et de se rencontrer.

Nos adhérents reçoivent à leur domicile le Journal du CNRS et l'A3-Magazine, journal de notre Association qui paraît deux à trois fois par an. Un autre type de lien est offert par notre site en ligne (www.a3cnrs.org) qui présente l'Association et ses activités variées. Depuis l'automne 2020, une lettre électronique régulière (une à trois fois par trimestre selon l'information disponible et la période) est envoyée aux adhérents.

L'Association organise tous les ans une assemblée générale à laquelle tous les adhérents sont invités. Elle se tient alternativement en région et à Paris. La plus récente s'est tenue à Paris les 20 et 21 mai 2019 ; celle de 2020 où nous espérons fêter les 30 ans de notre association n'a pu comme prévu se tenir à Lyon les 5 et 6 octobre en raison du contexte sanitaire. Si la situation s'améliore, l'assemblée générale 2021 devrait prendre place à Lyon à l'automne prochain.

Nos adhérents peuvent aussi participer aux rencontres scientifiques et culturelles organisées dans les régions, ou encore aux voyages en France et à l'étranger ouverts à tous. Dans le cadre des régions, les conférences ou les visites, organisées localement par l'intermédiaire de nos représentants régionaux, sont des pôles d'animation accessibles et très appréciés.

L'Association des Anciens et Amis du CNRS a pour deuxième mission de contribuer au Rayonnement du CNRS. Dans ce cadre, les efforts antérieurement entrepris pour un développement à l'international, en tentant de recréer des liens avec nos collègues étrangers, méritent d'être réexaminés selon de nouvelles modalités et non sans avoir, au préalable, renforcé notre implantation nationale.

En France, les échanges lors de visites scientifiques dans les laboratoires ou entreprises, notre participation aux journées de sensibilisation à la science, les conférences offertes dans certains centres ou milieux professionnels, constituent une contribution importante au rayonnement du CNRS, de la recherche et de la science dans le grand public.

L'association reste ouverte à toutes les suggestions que nous proposeront nos adhérents comme aux demandes extérieures.

Liliane Gorrichon et Elisabeth Giacobino - Présidente et Vice-présidente de l'A3 – février 2021

Illustrations de la couverture



Canal des Alpilles, Provence,
©Pascale Létique



Cultures légumières, Malte,
©Silvio Gianinazzi



Forêt de châtaigniers, La Corse,
©Marie-Laure Desprez-Loustau



Herbier marin, Mayotte,
©Christian Hily

A3 Magazine n° 76 - Printemps 2021

L'ÉDITORIAL DE LA PRÉSIDENTE
LE MOT DE LA RÉDACTION2
3LA SANTÉ DES PLANTES
AVANT-PROPOS

5

- **L'histoire de la protection des cultures** 5
André Fougeroux
- **Pollution anthropique** *Fabrice Martin-Laurent* 10
- **Interactions insectes-plantes** 14
Paul-André Calatayud
- **Santé des forêts** *Marie-Laure Desprez-Loustau* 19
- **Herbiers marins** *Christian Hily* 25
- **Microbiote symbiotique** 31
Marc-André Selosse & Vivienne Gianinazzi-Pearson
- **L'immunité végétale** *Silvio Gianinazzi* 36
- **Réécriture génomique** *Georges Pelletier* 41
- **Risques de maladies et ravageurs émergents** 46
Françoise Petter & Muriel Suffert

EN SAVOIR PLUS

52

- **Des graines, des fleurs et de l'ADN** *Michel Delseny*
- **Des plantes biotech au service de la santé du végétal et de l'environnement** *Catherine Regnault-Roger*
- **La symbiose. Structures et fonctions, rôle écologique et évolutif** *Marc-André Selosse*
- **Jamais seuls, ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations** *Marc-André Selosse*
- **Interactions insectes-plantes** *Nicolas Sauvion, Paul-André Calatayud, Denis Thiéry, Frédéric Marion-Poll*
- **Trajectoires de la génétique** *Bernard Dujon, Georges Pelletier*
- **Santé du végétal : 100 ans déjà !**
Catherine Regnault-Roger, André Fougeroux
- **L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies** *Christian Lannou et al.*

SPOTS

55

- **Maladies emblématiques** *André et Christiane Perrin*
- **Faire parler les charbons de bois issus de l'incendie de Notre-Dame** *Damien Deldicque, Jean-Noël Rouzaud*
- **Zoom sur la recherche en santé végétale au CNRS : l'IBMP de Strasbourg** *Bernard Fritig*
- **Linné (1707-1778)** *Marie-Françoise Lafon*

KIOSQUE

66

- **Les révolutions de la biologie et la condition humaine**
Patrice Debré
- **Maurice Genevoix l'écologiste** *Jacques Tassin*
- **La sardine et le diamant, de l'utilité de l'ordre et du désordre** *Catherine Bréchnac*
- **Peut-on (encore) sauver la Corse (et les Corses) ?**
Fabrice Bonardi
- **La démocratie a-t-elle besoin de la science ?**
Pierre Papon
- **Les goûts et les couleurs du monde. Une histoire naturelle des tannins, de l'écologie à la santé**
Marc-André Selosse
- **L'intelligence des plantes en question**
sous la direction de Marc-Williams Debono
- **Qu'est-ce qu'une plante ? Essai sur la vie végétale**
Florence Burgat
- **Voyage en université** *Paul Vigny*

PASSIONS D'ADHÉRENTS(E)S

69

- **Le Brexit, et après ?** *Edmond Lisle*
- **Jean Malaurie, arpenteur des déserts froids et de l'âme humaine** *Giulia Bogliolo Bruna*
- **Le concours de la « nouvelle George Sand »**
Dominique Simon
- **Passion de la poésie, passion des milieux extrêmes**
Anne-Marie Pillet-Schwartz
- **Ô corona, poèmes d'un confiné, le Poète-roi**
Chaunes (Jean-Patrick Connerade)

IN MEMORIAM

72

RAYONNEMENT DU CNRS

75

Chers collègues et ami(e)s,

Une première que ce numéro de A3 Magazine pour notre nouvelle équipe de rédaction, conduite par Véronique Machelon et Vivienne Gianinazzi-Pearson ! Avant d'aller plus loin, permettez-moi de les remercier pour avoir pris avec efficacité le relais de celle qu'animait le précédent comité de rédaction et tout particulièrement Paul Gille et Fabrice Bonardi - qui ont accepté de continuer à apporter leur concours. Leur attention et leurs efforts, soutenus pendant tant d'années, ont pu être appréciés par chacun de vous tant pour la qualité que la diversité des thèmes abordés dans les différents numéros du journal. Nous ne saurions assez aujourd'hui leur exprimer notre gratitude en cette période où nous fêtons le 30^e anniversaire de la création du Magazine.

Mais revenons à ce nouveau numéro. Il est centré sur les sciences végétales et propose un focus sur la santé des plantes, dans le cadre de l'Année internationale de la santé des végétaux de la FAO.

« Quelle audace et quel courage eurent les racines, les bulbes, les tiges, les feuilles ! Elles firent l'effort de surgir de l'eau / Elles firent l'effort de se dresser et de fabriquer sans le savoir une teinte si différente de celle de la nuit, de celle de l'atmosphère qui entourait la terre, de celle du soleil, de celle de la mer./Elles firent émerger la couleur verte dans ce monde. Elles firent apparaître toutes sortes de verts sublimes /.../ » (Pascal Quignard- L'homme aux trois lettres- Grasset 2020 p.87)

La question de la santé végétale est cruciale et parfois polémique. Les différents points de vue présentés ici

constituent un panorama large et diversifié des questions actuellement en discussion. Qu'elles concernent la protection des cultures, l'état de santé des herbiers marins, celui de nos forêts, ou celui des sols qui portent les végétaux, l'impact des insectes ou du microbiote sur la santé végétale. Plusieurs dossiers interrogent aussi sur la vulnérabilité des végétaux dans le cadre des changements climatiques en cours, sur la défense que peut apporter leur immunité naturelle, les outils biologiques disponibles pour les applications agronomiques attendues, et l'importance de la surveillance et l'alerte de nouvelles maladies. Deux autres articles sont relatifs, l'un aux maladies emblématiques et l'autre à la recherche en santé végétale au CNRS. Vous serez sans doute intéressés aussi par la biographie de C. von Linné « prince des botanistes » et par ces nouveaux outils physicochimiques qui permettent l'étude de bois carbonisés, avec l'exemple donné ici dans l'étude de ceux de Notre-Dame, un travail qui met en lumière si j'ose dire, l'intérêt du « temps long » de la recherche... Les rubriques classiques, les brèves, le kiosque, les livres, les courriers d'adhérent(e)s sont également présents.



Spécimen résistant à la sécheresse

Nous souhaitons enfin que la longue période « d'hibernation » que nous avons connue soit derrière nous et que nous puissions retrouver toutes nos activités sans entraves.

Liliane Gorrichon

LE MOT DE LA RÉDACTION

Il y a dix ans, presque jour pour jour, nous prenions les rênes, confiés par le regretté Victor Scardigli, de ce qui était alors le Bulletin de l'A3. Avec Bernard Dupuis, notre maquettiste attitré, puis avec le renfort d'Annie Demichel, secrétaire de rédaction, nous nous sommes efforcés de faire évoluer, en douceur, ce qui est devenu A3 Magazine. Ce fut quelquefois dans la difficulté, mais toujours avec passion ! Et puis, au fil des numéros, tandis que notre équipe prenait de l'âge, le lectorat, lui rajeunissait... Il était donc temps de donner un nouveau souffle au magazine, en renouvelant sa rédaction. La chance devait nous sourire, car Véronique Machelon et Vivienne Gianinazzi-Pearson, aux compétences unanimement appréciées, acceptèrent la mission avec enthousiasme ! Entre leurs mains, le magazine est sur la meilleure voie possible, d'autant que Bernard poursuit l'exercice à leur côté. Ce sont donc de belles et bonnes lectures qui nous attendent !

Fabrice Bonardi et Paul Gille

L'année 2020 fut à bien des égards une année différente. Malgré la pandémie, l'A3 Magazine a tenu bon et a tenu à honneur de continuer sa mission. Nous tenons ici à en remercier toute l'équipe, en particulier Paul Gille, Fabrice Bonardi, Annie Demichel, et notre fidèle maquettiste Bernard Dupuis. En septembre dernier, Fabrice Bonardi et Paul Gille nous ont laissé les rênes et c'est une nouvelle équipe, du moins en partie, qui a « repris les manettes ». Merci de leur confiance. Paul et Fabrice avec toute leur équipe et leur réseau ont œuvré sans relâche pendant près de 10 ans pour nous offrir plusieurs numéros par an du Bulletin puis à partir de 2015 du Magazine de l'A3, riches en contenu, variant les sujets en prise avec l'actualité et les multiples facettes de la recherche au CNRS et ailleurs. Ils ont toujours eu aussi à cœur, au travers de la rubrique « Vie des régions », de contribuer à maintenir des relations étroites entre les différentes représentations régionales, nous faisant partager par les comptes rendus de voyages et d'activités un peu de la vie des adhérents géographiquement plus éloignés. Un nouveau tandem de rédaction s'est mis en place, soyez assurés que nous mettrons toute notre énergie pour être à la hauteur des attentes de nos lectrices et lecteurs. Avec l'aide de toute l'équipe, nous tâcherons de continuer à faire de notre Magazine un moyen de faire connaître et diffuser les actualités scientifiques auprès de tous les adhérents et au-delà si possible, sans oublier qu'il est aussi un moyen de conserver des liens précieux entre nous.

Véronique Machelon, rédactrice en chef. Après des études de génétique et de pharmacie, j'ai été recrutée comme chercheur au CNRS en 1977. Au cours de ma carrière professionnelle que j'ai poursuivie à l'Inserm de 1987 à 2014, j'ai entre autres travaillé dans l'équipe de Jacques Testart à l'hôpital Bécclère à Clamart en reproduction humaine, puis dans l'équipe de Dominique Emilie en immunologie, axant mes recherches sur l'étude des chimiokines dans les tumeurs. Une fois à la retraite, j'ai adhéré à l'A3. Depuis 2015, j'étais représentante régionale pour l'Ile-de-France. Aujourd'hui, je laisse la place à d'autres pour me consacrer à l'A3 Magazine. Avant d'en devenir rédactrice en chef en septembre dernier, j'avais collaboré occasionnellement au Magazine, pour des entretiens de personnalités ainsi que des comptes rendus de livres ou de visites. Le Magazine n'est donc pas un domaine tout à fait inexploré pour moi et c'est avec un grand plaisir qu'aux côtés de Vivienne Gianinazzi-Pearson je reprends les rênes de la revue.



Vivienne Gianinazzi-Pearson, éditrice. Je suis entrée au CNRS en 1977, après un doctorat en Angleterre, pour développer des recherches sur les mécanismes qui déterminent les interactions plantes-microorganismes bénéfiques. Responsable d'une équipe de recherche, puis directeur d'une unité CNRS (UMR 5184, Dijon), j'ai effectué toute ma carrière de chercheur dans les murs de l'Inra (devenu INRAE) au carrefour des recherches fondamentales et appliquées en Agromicrobiologie. Toujours à la recherche d'échanges fructueux, j'ai coordonné des projets internationaux, enseigné comme professeur invité à l'étranger (DE, CN), et assuré le travail d'éditeur en chef du journal international *Mycorrhiza* pendant 20 ans. Depuis ma retraite, je continue quelques activités d'expert, participe au conseil d'administration de l'A3, et retrouve avec plaisir l'activité d'éditrice auprès de notre Magazine en tandem avec Véronique.



La recherche scientifique et son développement ont été, pour la plupart, le but de notre activité professionnelle. Mais ne vous inquiétez pas, nos sujets d'intérêt ne s'arrêtent pas à la biologie, même si l'actualité y fait largement référence. Nous aurons à cœur d'ouvrir l'A3 Magazine à tous les sujets d'intérêt qui permettent de mieux comprendre le monde où nous vivons et de découvrir les trésors qui s'y cachent. C'est aussi notre revue à tous et nous ne manquerons pas de faire appel à vos compétences pour contribuer à la réalisation des numéros, et de vous donner la parole au travers de la rubrique « Passions d'adhérent(e)s ». Comme on ne parle jamais si bien que de ce que l'on connaît bien, nous avons décidé de consacrer ce premier numéro que vous allez découvrir à la santé des végétaux. Un sujet d'actualité qui, nous l'espérons, vous permettra d'avoir une vision plus complète du monde végétal qui nous entoure, si essentiel à la qualité de notre vie. Pour des raisons que notre présidente, Liliane Gorrichon, a déjà exposées, la Lettre de l'A3 prend en partie le relais du Magazine pour diffuser de façon plus régulière et plus proche, les nouvelles de l'Association, tant au niveau national que régional. Nous continuerons toutefois à vous faire voyager dans la vie de l'Association qui reste bien présente en dépit des conditions minimales que nous impose cette période de pandémie ponctuée de confinements successifs.

*Véronique Machelon
et Vivienne Gianinazzi-Pearson*



Avant-propos

« Je me suis souvent demandé pourquoi les fleurs qu'on cultive sont de santé si fragile alors que celles qui poussent dans les champs et sur les montagnes se portent si bien. On peut aussi se poser la question : comment se fait-il que la mauve résiste à tout alors que la rose du Petit Prince est toujours sur le point de s'évanouir malgré tous les soins qu'il lui donne. Voilà des mystères à approfondir ».

Jean-Patrick Connerade

« Les plantes sont à la fois l'ornement de la terre et le moyen d'existence des animaux qui la peuplent... Les plantes fournissent à tous les âges de la vie des distractions agréables ou des enseignements utiles » (L. Figuière & A. Faguet 1865 Histoire des plantes, ouvrage illustré à l'usage de la jeunesse). En effet, elles sont les piliers de notre existence et constituent une ressource incontournable représentant jusqu'à 80% de notre alimentation, produisant 98% de l'oxygène que nous respirons, fournissant du bois pour nos habitats, nous soignant... Et elles procurent une multitude de plaisirs à nos sens: goût, odorat, beauté, douceur... La diversité des végétaux façonne les écosystèmes et modèle les paysages. Par conséquent, la santé des plantes est décisive pour la nôtre, celle des animaux et de l'environnement - un monde, une santé.

Les plantes ne se déplacent pas et leur santé est déterminée en grande partie par une nutrition équilibrée tirée d'une collaboration étroite avec une multitude de microbes du sol, symbiotiques ou saprophytes. De plus, elles ont élaboré des systèmes efficaces pour résister *in situ* aux différents ennemis apparus à travers des âges. Mais, depuis la domestication des plantes par nos aïeux,

l'agriculture a modifié leur équilibre naturel et créé des conditions favorables aux maladies. Nombreux sont les moyens de lutte développés au fil des temps par l'homme pour préserver la santé des végétaux, allant des incantations religieuses dans les civilisations anciennes, l'utilisation de moyens chimiques, le développement de la protection intégrée et plus récemment les biotechnologies issues du génie génétique.

Cependant, la santé des plantes est toujours menacée, non seulement par les bioagresseurs mais aussi par la pollution du sol et les changements climatiques, tant dans les écosystèmes naturels qu'anthropisés, terrestres ou aquatiques. Pour faire face aux défis de l'avenir, il devient important de prendre conscience de la

santé des plantes afin de préserver celle des animaux ou des humains, et d'imposer une agriculture durable qui respecte l'environnement et le fonctionnement des écosystèmes. C'est dans ce contexte que l'Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a lancé en 2020 l'Année internationale de la santé des végétaux (IYPH), pour « sensibiliser le public à la protection de la santé des végétaux comme levier pour éliminer la faim, réduire la pauvreté, protéger l'environnement et doper le développement économique »*. Compte tenu des impacts de la situation sanitaire sur son déroulement, la FAO a décidé de prolonger cet événement jusqu'en juillet 2021**.

Les quelques aspects de la santé des végétaux, parfois étonnants ou moins connus, sont présentés ici grâce aux auteurs qui ont donné de leur temps précieux pour partager leurs connaissances et qui nous tenons à remercier chaleureusement. La première partie de ce dossier traite des relations sanitaires des plantes avec leur environnement, suivie de deux exemples, puis sont abordés les mécanismes biologiques régulateurs de la santé des plantes, pour terminer par les aspects réglementaires.

Vivienne Gianinazzi-Pearson

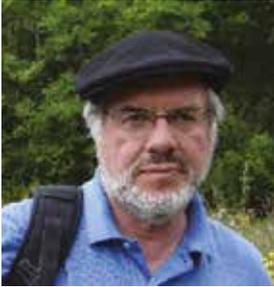


* www.fao.org/news/story/fr/item/1253764/icode/

** www.ippc.int/fr/publications/88803/

FAO. 2019. *International Year of Plant Health, 2020 : Communication guide*. Rome

L'histoire de la protection des cultures, leçons du passé pour l'agriculture future



André Fougeroux est ingénieur agronome spécialiste de protection des cultures et d'entomologie agricole. Il a occupé des fonctions au sein du service de la protection des végétaux (SPV) du ministère de l'Agriculture puis à l'Association de coordination technique agricole (Acta) avant d'être en charge du portefeuille insecticides et protection de semences chez Syngenta (Europe, Afrique, Moyen Orient) et d'exercer comme responsable national agriculture durable en France. Auteur d'ouvrages de référence et d'articles techniques. Membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France et apiculteur amateur.

Résumé : *Vieille de milliers d'années, la protection des cultures témoigne de l'évolution des connaissances des différentes époques. Elle est riche de questionnements, de doutes, d'euphorie, de désillusions, de désespoir, de fatalisme. Trouver des solutions aux problèmes posés par les insectes ravageurs des cultures, par les maladies des végétaux et par les « mauvaises herbes » a toujours fait partie du quotidien des agriculteurs. Et cela reste d'actualité.*

L'expansion démographique est spectaculaire : 1,2 milliard en 1850, 2,5 milliards en 1950, 7,2 milliards en 2017 et 9,8 milliards d'humains à l'horizon 2050. Nourrir l'humanité tout en gérant les ressources de la planète : voilà le défi capital auquel l'agriculture mondiale est confrontée aujourd'hui. La situation n'est pas si nouvelle que cela car depuis des siècles l'agriculture répond à la préoccupation majeure de l'espèce humaine de se procurer des ressources régulières et facilement accessibles pour ses besoins alimentaires, vestimentaires, énergétiques et d'habitat. Ce qui est nouveau, c'est la prise de conscience que nous vivons sur une planète dont les ressources sont limitées alors que la croissance démographique se poursuit. Parmi les ressources qui nécessitent une gestion, l'eau douce et les terres cultivables constituent des enjeux majeurs pour la production alimentaire. Si on prend les terres agricoles à l'échelle mondiale, on comptait 4300 m² de terre agricole par habitant en 1960, on ne comptera plus que 1900 m² par habitant en 2025. Cette évolution implique de continuer à produire plus de nourriture par unité de surface. La FAO a chiffré le besoin d'augmenter la production alimentaire mondiale de +70%. On estime la production agricole mondiale des principales cultures (riz, blé, orge, coton, soja, maïs, pommes de terre et café) à 8,59 milliards de tonnes produites dont **35% sont prélevés par les bioagresseurs**, en dépit des moyens de protection des cultures dont nous disposons. Ces pertes sont dues, pour 1,29 milliard de tonnes aux maladies, 1,12

milliard de tonnes aux ravageurs et 0,86 milliard de tonnes à la compétition générée par les adventices. Sans les moyens de protection, les pertes pourraient atteindre la moitié de la production mondiale (1). La protection des cultures reste donc une composante importante de l'amélioration de la production végétale.

Parmi les éléments qui concourent au rendement et à la qualité des récoltes, les différentes méthodes de protection des plantes occupent une place à part. Il ne s'agit pas, comme dans le cas des fertilisants ou de l'alimentation hydrique par exemple, d'un facteur de production stricto sensu qui contribue directement au rendement. Les moyens en question peuvent être de nature agronomique, mécanique, chimique ou biologique. En revanche, si la pullulation de ravageurs où la pression de pathogènes ou d'adventices devient préoccupante, une intervention spécifiquement dirigée est indispensable pour entraver leur effet négatif et préserver ainsi le potentiel de la culture (2). Ces constats imposent (avec une obligation de réussir) de continuer l'effort productif agricole, avec des rendements nécessairement en hausse, tout en améliorant la qualité et la régularité des productions. De plus, les attentes sociétales vis-à-vis de l'agriculture et de l'alimentation (l'un ne va pas sans l'autre) demandent, à juste titre, d'améliorer la production agricole en gérant durablement les surfaces cultivées, en préservant les terres cultivables contre l'urbanisation, en protégeant la biodiversité, et en s'adaptant au changement climatique. C'est à ce défi que l'agriculture doit répondre au XXI^e siècle.

L'ÉVOLUTION DE LA PROTECTION DES CULTURES

Cette évolution constante résulte des connaissances des différentes époques. Trouver des solutions aux problèmes posés par les insectes ravageurs des cultures, par les maladies des végétaux et par les « mauvaises herbes » a

toujours fait partie du quotidien des agriculteurs et, malgré nos progrès, cela reste une préoccupation majeure des agriculteurs dans le monde entier.

L'agriculture est née il y a environ 10 000 ans avec le passage progressif des sociétés humaines de l'étape de chasseurs-cueilleurs à celui de laboureur-éleveur. Les débuts de cultures vivrières se sont sans nul doute accompagnés de questions de protection de ces cultures contre des organismes comme les « mauvaises herbes » qui limitaient le développement des plantes cultivées, les champignons parasites ou les animaux qui prélevaient leur quote-part.

Confrontés à ces bioagresseurs, les hommes ont d'abord invoqué les dieux dont le mécontentement, pensaient-ils, se traduisait par ces « plaies » qui frappaient leurs cultures, et donc leur alimentation. Dans l'Avestale des Perses ou le calendrier rustique d'Hésiode (VII^e siècle avant notre ère), l'agriculture est un don des dieux. Les belles moissons reflètent la vertu et la piété du cultivateur. Les ravages des insectes et des maladies sur les cultures sont considérés comme des fléaux divins : « Je vous ai frappés par la rouille et la nielle, j'ai desséché vos jardins et vos vignes ; vos figuiers et vos oliviers, la sauterelle les a dévorés ; et vous n'êtes pas revenus à moi ! » (Amos – Oracle de Yahvé). Ce sentiment de « châtement divin » lié à un manque de dévotion des agriculteurs a perduré longtemps. Même si des approches plus rationnelles commencent à voir le jour au XVI^e siècle, il faudra attendre la fin du XIX^e siècle pour s'affranchir dans les campagnes de cette idée que les problèmes de protection des cultures sont liés aux croyances religieuses. Les processions (rogations) se sont poursuivies jusque récemment pour éviter aux cultures les aléas du climat et les dégâts des bioagresseurs. Réalisant que les rogations n'étaient pas toujours suffisantes, l'Histoire est émaillée d'appels de malheureux paysans qui, voyant leurs cultures dépérir, en appelaient aux autorités religieuses, comme l'atteste cette réponse ecclésiastique en 1514, citée par Balachowski (1951) : « Parties ouïes, faisant droit à la requête des habitants de Villenoxe, admonestons les chenilles de se retirer dans six jours ou à défaut de ce faire, les déclarons maudites et excommuniées ! ». En même temps, et sûrement par sécurité, chaque fois que nécessaire, ils mettaient en œuvre des méthodes palliatives ou intervenaient physiquement. La protection des cultures recoupe alors l'adage : « Aide-toi, le Ciel t'aidera » (3).

Les agriculteurs ont tout essayé pour limiter les dégâts sur leurs cultures : le feu, les arrachages, les plantes plus résistantes, les modes de culture, les pièges, et bien sûr

toutes les substances qui étaient susceptibles de « soigner » leurs cultures. Depuis l'Antiquité, nombreuses sont les substances issues de la pharmacopée humaine qui ont été testées. Ces substances provenaient de minéraux : soufre, cuivre, mercure, arsenic, cyanure, acide sulfurique...mais aussi des végétaux : pyréthrine, nicotine, roténone, goudrons, décoction de plantes diverses voire parfois d'animaux : suif, huiles de poisson, de baleine, ... De nombreuses recettes plus ou moins éprouvées circulaient dans les campagnes. Le développement des sciences et notamment de la chimie au XIX^e siècle a apporté des approches plus rationnelles et scientifiques.

LA PÉRIODE OPTIMISTE (1750-2000)

Le rassemblement des savoirs empiriques des cultivateurs, des approches d'esprits éclairés qui ont réalisé l'importance de l'agriculture dans l'économie nationale, et les seize famines qui ont émaillé le XVIII^e siècle ont souligné l'urgence d'améliorer les productions agricoles et de résoudre les problèmes de protection des cultures. Le développement des sciences notamment en biologie et en chimie a permis de proposer des nouvelles solutions aux agriculteurs. Une maladie majeure des blés, la carie, a été résolue par la démonstration de la contagion d'un « venin » ou d'un « virus » d'un grain à l'autre et l'action bénéfique du traitement des semences de blé au lait de chaux. Les insectes, causes visibles de dégradation des récoltes, ont aussi été étudiés. Petit à petit l'idée de détruire ces « nuisibles » par tous les moyens s'est imposée ; elle va perdurer jusqu'à la fin du XX^e siècle. Ce sont tout d'abord des méthodes de ramassages manuels qui ont été pratiquées : faisant le lien entre population de nuisibles et dégâts, les agriculteurs ont réalisé qu'en ramassant « les chenilles et autres sauteriaux » qui envahissaient leurs champs, et en les éliminant, ils limitaient les dégâts aux récoltes. La destruction des chenilles, ou « échenillage », fut l'objet en France de la loi du 26 Ventôse an IV (1796) « prescrivant l'échenillage obligatoire ». Pour lutter contre les hannetons (coléoptères), en 1844, le département de la Sarthe les a fait recueillir, au moyen de primes, et on évalue à 250 millions le nombre d'insectes détruits par ce moyen (3). Entre 1922 et 1944, les classes d'enfants étaient réquisitionnées une demi-journée par semaine pour ramasser les doryphores à la main, sous la houlette de leur instituteur. Le désherbage des cultures était généralement effectué manuellement par les femmes et les enfants qui constituaient une main d'œuvre abondante. L'école obligatoire, la saignée de la première guerre mondiale dans les populations rurales, l'exode rural ont réduit considérablement cette main d'œuvre.

LA SCIENCE POUR PALLIER LE MANQUE DE MAIN-D'ŒUVRE

Il a fallu trouver d'autres solutions et le recours à la chimie s'est rapidement imposé. L'acide sulfurique a remplacé le désherbage manuel, la bouillie bordelaise a montré son intérêt pour limiter les maladies des végétaux (mildious, tavelure, ...), les sels d'arsenic ont remplacé les ramassages d'insectes. La fin du XIX^e siècle et le début du XX^e ont vu l'expansion de solutions issues de la chimie minérale comme les sels d'arsenic, de cyanure, le sulfure de carbone, l'acide cyanhydrique, ... En parallèle, les industries de la chimie et du machinisme se sont spécialisées dans la production de substances et de matériel d'application dédiés à la protection des plantes. Dès le début, la toxicité de certaines substances comme l'arsenic par exemple interpellait les utilisateurs et les responsables publics mais elle traduisait aussi le désarroi des agriculteurs face aux problèmes posés par les bioagresseurs sur leurs cultures. Pour réduire les risques toxicologiques, les législateurs ont peu à peu précisé l'emploi de ces produits sous forme de recommandations mais aussi de législation. Le décret-loi du 2 novembre 1943 prévoit un contrôle des antiseptiques, fongicides, herbicides et de tous les produits concernant la destruction des vertébrés et invertébrés. Ce texte a pour principal objectif de protéger les agriculteurs des abus industriels en n'autorisant que les substances véritablement dotées d'une action efficace et de contrôler la composition des produits. Elle a imposé de définir les spécifications exactes des produits autorisés (composition, formulation, doses d'emploi, usages, ...) mais elle a aussi initié le besoin d'études de toxicité, assorties de mesures de prévention des risques.



Application de fongicide sur céréales ©Pierre Sergueeff

Depuis, la chimie a continué de se développer et la protection des cultures a bénéficié des progrès de cette discipline aussi bien pour la synthèse que pour le développement de méthodes d'études de nouvelles solutions. Cette chimie minérale a cédé la place progressivement à la chimie organique. Le tournant majeur est sans nul doute la découverte des propriétés insecticides du DDT, découvertes en 1939 en Suisse par P.H. Müller, un chimiste chez Geigy SA, prix Nobel de médecine en 1948. L'arri-

vée de ces insecticides, d'abord pour la santé humaine puis pour l'utilisation sur les cultures, a été suivie par l'arrivée des phytohormones pour désherber les céréales, de tous les fongicides, mais aussi des triazines, pour le désherbage du maïs. Mais leur facilité d'emploi, un sentiment d'innocuité et les efficacités observées ont conduit à des excès de confiance et d'usage.

Cette utilisation irraisonnée a conduit au développement des résistances, à l'apparition de problèmes phytosanitaires nouveaux qui remplaçaient les bioagresseurs précédents (La nature a horreur du vide), mais aussi à des conséquences sur l'environnement, et à des préoccupations de santé des utilisateurs et des consommateurs. Rapidement des entomologistes puis des scientifiques vont émettre des réserves sur l'utilisation généralisée des insecticides puis recommandent que leur utilisation soit basée sur des connaissances écologiques. Les alertes environnementales, et particulièrement la question de l'accumulation des insecticides organochlorés dans les chaînes alimentaires, vont être portées à la connaissance du public notamment avec le succès du livre de Rachel Carson « Printemps silencieux » publié en 1962. Cette prise de conscience qui s'intéresse en premier lieu aux insecticides va rapidement s'élargir à l'ensemble des produits phytosanitaires. Au niveau international, les effets dénoncés ont conduit au développement de l'écotoxicologie, à savoir la science de l'évaluation du devenir des xénobiotiques dans tous les compartiments de l'environnement. Cette remise en cause sociétale va aussi apporter de nombreuses améliorations, en termes de législation dont un est majeur : le développement de la lutte intégrée.

LA PROTECTION INTÉGRÉE

En 1952 A.E. Michelbacher et O.G. Bacon (4) sont les premiers à présenter le concept de lutte intégrée (*Integrated Control*). Ils ont montré l'intérêt de raisonner l'utilisation des produits en intégrant la régulation naturelle des populations de ravageurs dans le choix de l'intervention. En 1955 a lieu la première session de la Commission internationale de lutte biologique à Antibes, qui était déjà un centre de recherches important sur la lutte biologique, suivie par la création en 1956, de l'OILB (Organisation internationale de lutte biologique et de protection intégrée) qui a tenu sa première assemblée générale à Paris en 1958. La France et beaucoup de chercheurs de l'Inra ont joué un rôle majeur dans cette nouvelle vision de la protection des cultures.

Alors, qu'est-ce que la protection intégrée ? Le premier point consiste à se s'interroger sur le mode de production

ainsi que les objectifs en quantités et en qualités. Cette approche, plus complexe, nécessite des connaissances biologiques et écologiques pour éviter les interventions « à l'aveugle ». Il devient fondamental de connaître le cycle du bioagresseur ce qui permet de choisir et positionner l'intervention à bon escient. Cette connaissance de l'intervention au bon stade s'appuie sur des observations, des piégeages, des techniques de suivi des populations et, avec le développement de l'informatique, des modèles de prévision associés à l'analyse d'images. La résistance variétale devient un levier majeur de gestion des risques. De la même façon, les méthodes physiques constituent dans certaines situations, des outils efficaces. C'est le cas des filets anti-carpocapses appliqués sur des pommiers. S'ajoutent à ces techniques la mise en œuvre des organismes antagonistes dans le cadre de la lutte biologique et plus largement des techniques de biocontrôle. C'est ainsi qu'en production fruitière et en vigne, les médiateurs chimiques et plus particulièrement les phéromones synthétiques femelles pour confondre les mâles (confusion sexuelle) sont largement employées dans les vergers européens. Ces progrès sont remarquables mais dans le concept de protection intégrée, en dernier ressort, la lutte chimique reste un outil de protection des cultures disponible en tenant compte des effets sur l'utilisateur, le consommateur, l'environnement et les organismes non-cibles, ainsi qu'en faisant attention à gérer au mieux les résistances. La reconnaissance réglementaire de ce concept est désormais établie aussi bien à l'échelle nationale qu'européenne : « Il convient que les États membres encouragent une lutte contre les ennemis des cultures à faible apport en pesticides, en particulier la lutte intégrée contre les ennemis des cultures, et qu'ils créent les conditions et prennent les mesures nécessaires à sa mise en œuvre (Directive 2009/128/CE) ».



La gestion des paysages agricoles à la base de l'agroécologie.
©André Fougeroux

La protection intégrée va continuer et étendre ses applications à l'agroécologie. La connaissance du rôle des paysages, les méthodes culturales, le développement de l'écologie chimique, les connaissances des microbiomes et le développement de la robotique sont autant de sources pour faire évoluer cette approche de la protection des cultures qui veut qu'aucune solution à elle seule soit capable de résoudre les problèmes. Le machinisme a aussi apporté son savoir-faire pour résoudre certains problèmes de protection des cultures. Les hommes ont ainsi été aidés pour le désherbage grâce aux machines tractées comme les bineuses, sarcleuses, houes, rasettes...

LA LUTTE BIOLOGIQUE

Bien sûr pendant cette période, il y a eu aussi d'autres approches que la chimie. La lutte biologique a été mise en œuvre pour réguler certains ravageurs et certaines introductions ont connu des succès retentissants. Ce fut le cas de la coccinelle *Rodolia cardinalis* (Mulsant) pour lutter contre la cochenille australienne des agrumes *Icerya purchasi* (Mask) qui ravageait les agrumes à partir de 1868 en Californie. C.V. Riley, responsable de la division « Entomologie » du département de l'agriculture américain, mit en élevage cette coccinelle prédatrice de la cochenille australienne. En deux ans, les populations de cette dernière furent réduites et leurs dégâts devinrent acceptables. Cette réussite, qui démontra en grandeur nature l'efficacité de la lutte biologique dans la protection des cultures, fut suivie d'expériences semblables pour limiter d'autres ravageurs (hanneton, doryphore, tordeuses de la vigne...) mais qui ne furent pas aussi réussies. Ces difficultés montrèrent que les mécanismes de régulations doivent être bien étudiés avant de trouver des débouchés pratiques et économiques de la lutte biologique.



Coccinelle : symbole de la lutte biologique.
©André Fougeroux

ALORS, DEMAIN... L'HUMILITÉ !

Pendant le XX^e siècle, on a pensé que la chimie, la physique et la biologie seraient maîtres des problèmes de protection des cultures. L'expérience nous montre que nous devons faire preuve d'humilité. Les interactions dans les milieux cultivés sont d'une complexité que nous imaginons encore mal. On réalise aujourd'hui que détruire une espèce aussi nuisible soit-elle n'est pas une solution durable. Tous les slogans passés, sont désuets et il s'agit aujourd'hui de composer entre protection des cultures et attentes de la société. Cette nouvelle orientation a une conséquence directe : « on n'éradique plus, on gère ! ». Sous ce slogan, il y a une révolution des pensées qui veulent que l'homme ne maîtrise pas la nature mais doit s'y adapter. Elle débouche sur les nouvelles conceptions de la protection des cultures qui feront les progrès du XXI^e siècle :

- Les problèmes de protection des cultures contre les bioagresseurs ne disparaîtront jamais et nous devons composer avec.
- L'idée d'éradiquer un bioagresseur quel qu'il soit est illusoire (au moins sur des territoires continentaux).
- La gestion des populations de bioagresseurs doit être la priorité en utilisant l'ensemble des moyens disponibles en écho à la phrase de P. Marchal (1940) qui reste actuelle : « *Ce n'est que par la combinaison rationnelle des méthodes que dans le domaine de la lutte contre les grands ennemis des cultures, on peut espérer le succès* » (5).

POUR CONCLURE

Par beaucoup d'aspects, les questions de protection des cultures sont très similaires aux questions de santé humaine. Longtemps subies avec fatalisme, les pertes et les nuisances aux plantes cultivées et aux produits récoltés ne sont plus tolérées par nos civilisations. Là où des interventions artisanales suffisaient à limiter les dégâts, il faut, aujourd'hui, des méthodes de protection des cultures plus performantes pour satisfaire des besoins d'une population de plus en plus nombreuse. Pendant longtemps confinées au milieu agricole, les questions de protection des cultures ont pris aujourd'hui une dimension sociétale. Cet intérêt de la société civile pour la protection des cultures fait suite à l'emploi des pesticides sur des larges surfaces avec les interrogations légitimes quant aux effets potentiels sur la qualité de l'alimentation, la santé humaine et l'environnement.

Cette démarche prend place dans un long processus qui s'appuie non seulement sur l'évolution des technologies mais aussi sur des choix politiques et sociétaux. L'ampleur et l'âpreté des débats en cours sur la politique de développement agricole, sur l'utilisation des produits phytosanitaires mais aussi des biotechnologies le montrent. Les progrès scientifiques et technologiques sont contestés, remis en cause voire rejetés. Aujourd'hui la protection des cultures, la santé du végétal et la qualité de l'alimentation sont au cœur d'enjeux dans lesquels différents facteurs tels que les progrès de la connaissance, la mondialisation mais aussi l'augmentation de l'emprise de l'homme sur la planète, conséquence de sa démographie, modifient les choix sociétaux concernant l'agriculture et ses options économiques.

Pour répondre à cette demande sociétale légitime, les sciences de la protection des plantes s'orientent vers la gestion des populations de bioagresseurs plutôt que vers une éradication. Ce changement récent d'orientation nécessite plus de connaissances sur l'écologie des espèces concernées qu'elles soient cultivées ou non. Il s'agit aussi d'une approche plus complexe, moins binaire et moins « confortable » pour les agriculteurs. Conduisant le XX^e siècle au XXI^e siècle, elle traduit une tendance majeure qui abandonnera les « cides » (insecticides, fongicides, herbicides, bactéricides...) aux « fuges » et qui verra un transfert progressif de la chimie conventionnelle vers les solutions de biocontrôle. Notre alimentation de demain dépend du succès de ce nouveau défi !

RÉFÉRENCES

- (1) Oerke E-C (2006) Crop losses to pests. *J. Agric.Sci.* 144 : 31-43.
- (2) Bernard J-L & Ambolet B (2018) *Agroécologie et protection des cultures in Santé des plantes : 100 ans déjà*. Ed. Presses des Mines, 185 p.
- (3) Gobin H (1865) Guide pratique d'entomologie agricole et petit traité de la destruction des insectes nuisibles p. 48.
- (4) Michelbacher AE & Bacon OG (1952) Walnut insect and spider mite control in Northern California. *J. Econ. Entomol.* 45:1020-1027.
- (5) Marchal P (1940) in Bain C, Bernard J-L, Fougeroux A (2010) *Histoire de la protection des cultures*. Ed. Champ libre Groupe France Agricole.

Pollution anthropique, santé du sol au centre de la santé des plantes et des agroécosystèmes



Fabrice Martin-Laurent, directeur de recherches INRAE, est spécialiste en écotoxicologie microbienne. Après son doctorat sur les gènes végétaux impliqués dans l'établissement de symbiose endomycorhizienne (Inra/MPI Marbourg), il a travaillé dans le cadre de la coopération scientifique à Singapour pour le Cirad-Forêt sur l'inoculation microbienne d'*Acacia mangium* afin de reforester des sols dégradés d'Asie du Sud-Est. Suite à un Post-Doc CNRS (Gif-sur-Yvette) sur l'expression des aquaporines in planta, il est entré comme chercheur à l'Inra Dijon pour étudier les communautés microbiennes des sols, en particulier l'impact des pesticides sur les microorganismes du sol. Il a dirigé le Centre régional d'innovation et de transfert de technologie en agroenvironnement d'uB-Filiale. Il a co-créé le réseau international EcotoxicoMic et il co-anime actuellement le réseau français Ecotox. Il est directeur adjoint de l'UMR Agroécologie où il dirige le pôle Biologie et fonctions écosystémiques des sols (BIOmE).

Résumé : Les sols constituent un habitat complexe hébergeant de nombreux groupes d'organismes vivants qui interagissent et accomplissent des fonctions supportant les services écosystémiques des sols, contribuant aux productions végétale et animale. Les microorganismes sont de loin les plus abondants et les plus divers dans les sols. Toutefois, en raison de difficultés méthodologiques, ils sont encore peu décrits et quasiment ignorés des dispositifs réglementaires, tout comme les sols. Avec l'anthropocène, il est devenu urgent de protéger les sols et la biodiversité qu'ils hébergent. Dans cette perspective, l'écotoxicologie microbienne vise à évaluer l'impact des polluants sur les microorganismes et en retour, le rôle de ces derniers dans l'écodynamique des polluants. Cette discipline d'origine récente contribue à l'acquisition de nouvelles données, la proposition de nouvelles méthodes et à la proposition de l'évolution du cadre réglementaire pour protéger les sols.

ORIGINE ET FONCTIONS REMPLIES PAR LES SOLS

Les sols, longtemps considérés comme support inerte pour les plantes, sont un milieu bouillonnant de vie où les composants biotiques sont aussi importants que ceux abiotiques pour la santé végétale. C'est la succession d'un ensemble de processus d'origine abiotique et biotique (pédogénèse) qui conduisent à modifier des matériaux parentaux (roche mère, matières organiques) et aboutissent à la formation et à l'évolution des sols. Ils sont un habitat éminemment complexe, aussi bien de par leur nature hétérogène que de par l'incroyable diversité d'organismes vivants qu'ils hébergent, estimée au quart de la diversité actuellement connue sur Terre. Cette multitude d'organismes appartient à différents groupes tels que la macrofaune (vers de terre), la méso-

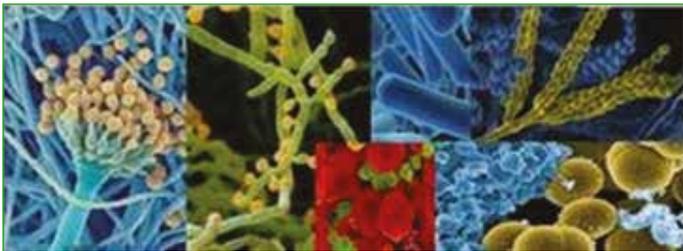
faune (collemboles, nématodes), la microfaune (protozoaires) et les microorganismes (archées, bactéries, champignons). Ils interagissent, formant des réseaux trophiques complexes qui par leurs activités assurent de nombreuses fonctions, tels que la fertilité du sol. Ils favorisent la santé des sols et par conséquent, la santé des plantes. Ainsi, les sols permettent les productions végétale et animale qui sont indispensables à l'alimentation humaine, mais ils contribuent aussi à l'accomplissement de différents services écosystémiques tels que le cycle des nutriments, la purification de l'eau ou encore la mitigation du changement climatique.



Profil d'un sol avec (A) une strate organique associée aux systèmes racinaires et (B) une strate minérale plus en profondeur.

Les microorganismes sont de loin les organismes vivants les plus abondants et les plus divers dans les sols. En effet, un gramme de sol contient plusieurs centaines de

milliers d'espèces fongiques et plusieurs millions d'espèces bactériennes. La plupart de ces microorganismes sont jusqu'à présents restés inconnus car non ou difficilement cultivables par des approches classiques de la microbiologie pasteurienne (0.5 à 10% des microorganismes totaux). L'extraordinaire développement des techniques de biologie moléculaire (PCR quantitative, séquençage haut débit), combinés au développement de méthodes d'extraction des acides nucléiques des sols (1), a permis d'estimer l'abondance des groupes microbiens et d'inventorier la composition des communautés microbiennes dans les sols. La composition de la communauté bactérienne a récemment été déterminée dans les sols français, dans le cadre d'un réseau de la mesure de la qualité des sols (RMQS). Cette étude a révélé que la diversité bactérienne identifiée est expliquée majoritairement par les propriétés physicochimiques des sols et leur mode d'usage (2). La recherche d'un lien possible entre la diversité taxonomique et la diversité fonctionnelle des communautés microbiennes est un sujet d'actualité sur lequel de nombreuses équipes travaillent car il conditionne les multiples fonctions écologiques supportées par les communautés microbiennes et donc les services écosystémiques rendus par les sols. Suite à la révélation de l'importance du microbiote intestinal pour la santé de l'Homme, le concept de microbiote a été transposé aux sols, où par analogie il joue un rôle clef dans la santé des sols et des agroécosystèmes.



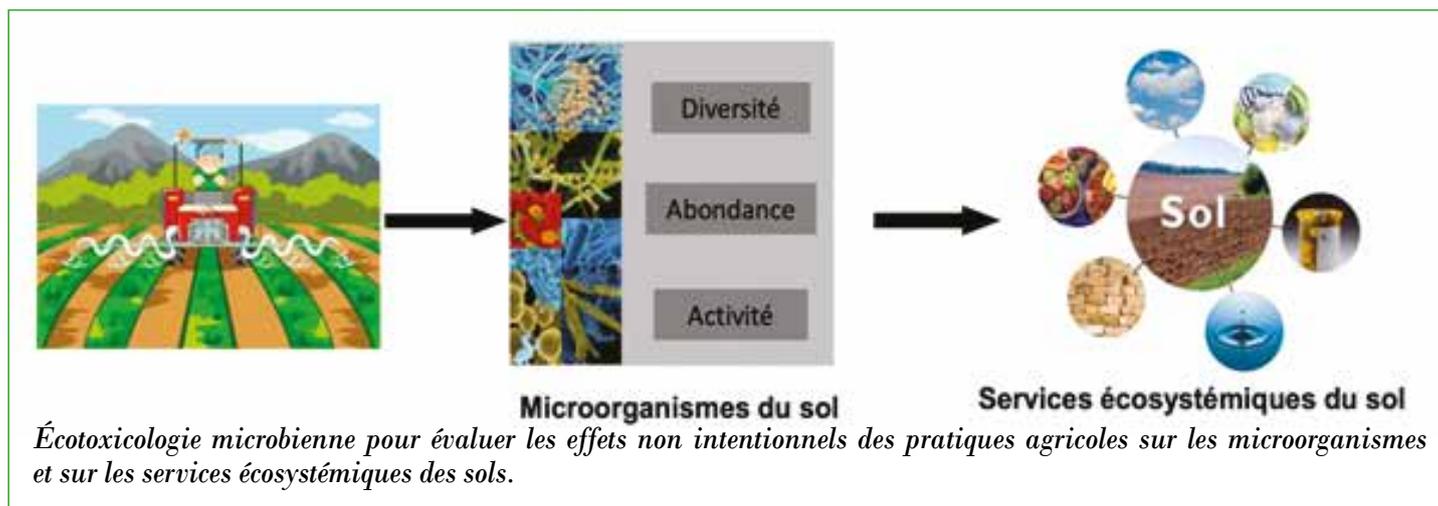
Exemple de la diversité des microorganismes du sol.

LES SOLS À L'HEURE DE L'ANTHROPOCÈNE BESOIN URGENT DE LES PROTÉGER

Les sols constituent un patrimoine pour l'humanité non-renouvelable à l'échelle de la vie humaine et qu'il faut s'attacher à préserver des atteintes multiples qu'ils subissent en raison notamment des activités humaines, afin qu'ils puissent continuer d'accomplir les services écosystémiques contribuant à la santé de l'environne-

ment et de l'Homme, souvent qualifiée de « *One Health* ». À l'âge de l'Anthropocène, caractérisée par un impact globale des activités humaines sur les écosystèmes terrestres, les sols sont menacés par des agressions multiples, dont une pollution par des composés issus de la synthèse chimique (pesticides, produits pharmaceutiques...). Malgré l'introduction de la transition agroécologique d'une partie des exploitations agricoles françaises, les sols restent encore largement exposés à des intrants chimiques (engrais, pesticides) et organiques de différentes natures (fumier, lisier, compost, boues de station d'épuration), pouvant eux-mêmes être contaminés par des métaux lourds ou des composés xénobiotiques qui incluent des composés pharmaceutiques (dont des antibiotiques), des nanoparticules, des micro-et nanoplastiques. Par ailleurs, la possibilité prochaine d'utiliser des eaux usées dans les pays de l'Union européenne (réglementation CE 2020/741) pour irriguer les cultures pourrait également constituer une voie d'entrée de différents contaminants métalliques et organiques dans les sols.

En l'absence de directive cadre européenne protégeant les sols, et ce malgré une proposition il y a plus d'une quinzaine d'années, les sols et les organismes vivants qu'ils hébergent restent le parent pauvre du point de vue réglementaire. Pour être mis sur le marché, les produits phytosanitaires doivent remplir les conditions requises par la directive cadre européenne (réglementation CE 2009/1107). Parmi celles-ci, l'industriel doit fournir les éléments nécessaires pour démontrer que la molécule active est efficace et qu'elle n'a pas d'effets inacceptables sur l'Homme ni sur les écosystèmes aquatiques ou terrestres. Toutefois, peut-être parce qu'ils ne sont pas visibles, les microorganismes non-pathogènes du sol restent peu pris en compte dans l'évaluation des risques environnementaux des produits phytosanitaires. Ainsi à ce jour, l'évaluation du risque a priori de ces produits sur les microorganismes nourrissant de matières organiques est uniquement réalisée par la mesure de la minéralisation du carbone (test OCDE 2017) et la minéralisation de l'azote (test OCDE 216). Bien que ces tests soient standardisés et utilisés depuis de nombreuses années par la réglementation, ils sont trop globaux et pas assez sensibles pour rendre compte de l'effet des pesticides sur les microorganismes du sol et sur les fonctions écosystémiques qu'ils soutiennent. Par ailleurs, en raison de l'absence d'une directive cadre de protection des sols, il n'existe pour l'instant aucune obligation



réglementaire à suivre les résidus de produits phytosanitaires et à évaluer leurs effets sur les organismes des sols ni sur les fonctions qu'ils assurent.

L'ÉCOTOXICOLOGIE MICROBIENNE, UNE DISCIPLINE SCIENTIFIQUE EN ÉMERGENCE

L'écotoxicologie microbienne est une discipline scientifique qui est apparue récemment, des décennies après l'émergence de l'écotoxicologie et de l'écologie microbienne. Elle vise à étudier à la fois (i) l'impact de la pollution agricole avec des composés chimiques (synthétique ou naturelle) ou biologiques (composés ou organismes vivants) sur les communautés de microorganismes du sol et sur les diverses fonctions qu'ils assurent, et (ii) le rôle des communautés microbiennes dans l'écodynamique des polluants (source, transfert, dégradation, transformation). Cette nouvelle discipline, promue par le réseau international d'Écotoxicologie microbienne (Ecotoxicomic, <https://ecotoxicomic.org/>) est par essence multidisciplinaire en étant positionnée au carrefour de l'écologie microbienne, de la toxicologie microbienne, de la physique et de la chimie de l'environnement. L'écotoxicologie microbienne s'inscrit pleinement dans les paradigmes « one health » et « ecohealth » qui soulignent l'urgence impérieuse de protéger la santé de l'environnement pour assurer la sécurité des systèmes de production alimentaire et préserver la santé de l'humanité (3).

Malgré les nombreuses initiatives visant à réduire l'usage d'intrants chimiques (produits phytosanitaires, engrais), les systèmes agricoles, même ceux qui sont en partie engagés dans la transition agroécologique, en dépendent encore grandement. Cette dépendance résulte fréquemment en la présence de résidus d'intrants chimiques dans les sols, les eaux de surface et les nappes phréatiques, ce qui soulève des inquiétudes quant à leur

impact sur les services rendus par les écosystèmes. Faisant le constat que la directive actuelle de la Commission européenne réglementant la mise sur le marché des produits phytosanitaires n'était pas assez protectrice, l'EFSA (*European Food Safety Authority*) a publié en 2010 une « opinion scientifique » pour définir de nouveaux objectifs spécifiques de protection afin de préserver les services écosystémiques remplis par les sols. Les microorganismes, vus comme des organismes non-cibles du point de vue réglementaire, sont définis comme une entité à protéger en raison de leur importance écologique dans l'accomplissement de nombreux services écosystémiques. En 2017, l'EFSA a publié une autre « opinion scientifique » sur « l'état de la science dans le domaine de l'évaluation du risque des produits de protection des plantes pour les organismes du sol » dans laquelle elle propose deux groupes microbiennes (bactéries du cycle d'azote, symbiose mycorhizienne) pour évaluer a priori l'écotoxicité des produits de protection des plantes sur les microorganismes des sols.

L'évaluation du risque *a posteriori* des produits phytosanitaires ne s'inscrit pour l'instant pas dans le cadre réglementaire de la Commission européenne, mais l'émergence du concept de « pesticidovigilance » montre l'importance du suivi post-homologation des produits dans l'évaluation du risque des intrants chimiques. Le concept de « pesticidovigilance » pourrait à terme être intégré dans le plan national de pharmacovigilance piloté sur le territoire français par l'Anses. Dans ce contexte, l'écotoxicologie microbienne est une discipline scientifique qui peut contribuer à, et proposer, une nouvelle approche pour évaluer l'écotoxicité des produits phytosanitaires vis-à-vis des microorganismes du sol. Des projets financés par la Commission européenne (*Ecofun-Microbiodiv, Love-to-Hate*) ont montré que dans le scénario du type « pire des cas », un herbicide faiblement dosé, appartenant à la famille des sulfo-

nylurées généralement appliqué sur les cultures de maïs, diminuait l'abondance et la diversité des populations de champignons formant les mycorhizes et le développement des plantes de maïs (4). Ils ont abouti à des propositions pour améliorer le cadre réglementaire d'évaluation du risque des produits phytosanitaires, notamment vis-à-vis des microorganismes du sol (5). Dans un autre projet européen (ARISTO), qui vient de débiter, une génération d'écotoxicologues microbiens spécialisés dans l'évaluation de la toxicité des pesticides sur les microorganismes du sol sera formée.

EVOLUTION DU CADRE RÉGLEMENTAIRE, UN DES LEVIERS POUR PROTÉGER LES SOLS

Malgré les efforts considérables déployés au cours de la dernière décennie, il n'y a guère de preuves que les états membres de l'Europe aient réussi à réduire les risques et endiguer les effets des produits phytosanitaires au niveau des sols, comme le prévoient les plans d'action nationaux des états membres. Des chercheurs ont récemment proposé dix mesures clés pour parvenir à une réduction des risques liés aux produits phytosanitaires et leur persistance dans l'environnement (6). Par exemple, de nouvelles technologies et de nouveaux cadres réglementaires pourraient être mis en œuvre et alignés avec tous les acteurs des chaînes de valeur des secteurs agricoles et agroalimentaires. Aussi une approche holistique est proposée pour faire progresser les politiques publiques en matière de gestion de l'usage des produits phytosanitaires, qui tient compte des principaux compromis et des zones de tension avec les autres objectifs de la politique agricole commune (PAC).

La nouvelle PAC, la stratégie « De la ferme à la table pour un système alimentaire équitable, sain et respectueux de l'environnement » et « le plan d'action pour une économie circulaire pour une Europe plus propre et plus compétitive », lancés dans le cadre du « *Green Deal* » (Pacte Vert) européen, agiront sans doute comme un catalyseur puissant du changement des systèmes agricoles, avec pour objectif d'atteindre un impact environnemental neutre ou positif, d'atténuer le changement climatique et de s'adapter à ses effets, d'inverser la perte de biodiversité, de garantir la sécurité alimentaire, la nutrition et la santé publique. Ce « *Green Deal* » doit pousser l'agriculture vers une nouvelle révolution en mettant en place de nouveaux systèmes reposant sur une meilleure utilisation de la biodiversité comme le préconise l'agroécologie. Il s'agira de promouvoir la lutte intégrée contre les ravageurs des cultures avec des composés naturels innovants (biocontrôle), d'utiliser des sous-produits (déchets organiques) et des produits recy-

clés (eaux usées) pour boucler les cycles des nutriments et atténuer les émissions de gaz à effet de serre et de mettre en œuvre de nouvelles technologies issues de divers domaines (biotechnologie, robotique) pour optimiser l'utilisation de ces ressources naturelles pour la production alimentaire.

Tous ces changements pour développer un système alimentaire respectueux de l'environnement auront très certainement des effets importants sur les sols et, en conséquence, sur les agrosystèmes, les services écosystémiques, et l'environnement en général. Pour surveiller les conséquences de ces changements, il faudra être en mesure d'évaluer la résilience et la récupération des sols en particulier agricoles. Une série de standards a déjà été élaboré par un des comités techniques de l'ISO (le comité TC190 « Méthodes biologiques ») pour évaluer la qualité des sols (7). Il a dressé une liste des méthodes disponibles pour évaluer la qualité des sols, produit des lignes directrices pour la caractérisation écotoxicologique des sols (ISO 15799:2019) et des matériaux pédologiques et des lignes directrices pour la sélection et l'évaluation des tests appliqués pour la caractérisation écotoxicologique des sols et des matériaux pédologiques (ISO 17616:2019). Il envisage maintenant de définir un ensemble de standards qui pourront être utilisés pour surveiller la résilience et la récupération des systèmes alimentaires et des services écosystémiques associés.

RÉFÉRENCES

- (1) Petric I *et al.* (2011) Inter-laboratory evaluation of the ISO standard 11063 « Soil quality - Method to directly extract DNA from soil samples ». *Journal of Microbiological Methods*. 84 : 454-460.
- (2) Terrat S *et al.* (2015) Meta-barcoded evaluation of the ISO standard 11063 DNA extraction procedure to characterize soil bacterial and fungal community diversity and composition. *Microbial Biotechnol.* 8 : 131-142.
- (3) Pesce S *et al.* (2020) Editorial: Microbial Ecotoxicology. *Frontiers in Microbiology* 11: 1342.
- (4) Karpouzas D G *et al.* (2014) Effects of nicosulfuron on the abundance and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi used as indicators of pesticide soil microbial toxicity. *Ecological Indicators* 39 : 44-53.
- (5) Storck V *et al.* (2017). Towards a better pesticide policy for the European Union. *Science of The Total Environment* 575 : 1027-1033.
- (6) Mörhing N *et al.* (2020) Pathways for advancing pesticide policies. *Nature Food* 1 : 535-540.
- (7) Thiele-Bruhn S *et al.* (2020). Identification of new microbial functional standards for soil quality assessment. *Soil* 6 :17-34.

Interactions insectes-plantes, hier et aujourd'hui



Paul-André Calatayud, entomologiste, est chercheur à l'IRD (l'Institut de recherche pour le développement) dans l'UMR EGCE (CNRS/IRD, Gif-sur-Yvette) et chercheur associé à l'icipe (International Center of Insect Physiology and Ecology, Kenya). Il est spécialiste des interactions plantes-insectes ravageurs-parasitoïdes, du comportement des insectes et de l'écologie chimique de ces interactions. Paul-André Calatayud a reçu le prix « Protection des plantes et de l'environnement » pour son doctorat obtenu en 1993 à l'université Claude Bernard et l'Institut national des sciences appliquées (Lyon). Il a obtenu son HDR à l'université Paris XI en 2011, et reçu en 2014 le prix « Ferchault de Réaumur » de la Société française d'entomologie pour son livre (co-édité) « Interactions insectes-plantes ». En 2019, l'icipe lui a attribué le titre du partenaire exceptionnel. Il est rédacteur en chef adjoint des revues « Annales de la Société entomologique de France » et « International Journal of Tropical Insect Science ».

Résumé : Les insectes et les plantes se distinguent par leur capacité à exploiter un large éventail de niches, du désert à la zone arctique ; ils représentent ensemble environ la moitié de toutes les espèces connues des organismes multicellulaires. Les interactions insectes-plantes remontent à la période Dévonienne (420 millions d'années), commençant par la phytophagie, lorsque les plantes ont commencé à conquérir la terre. Elles sont probablement devenues plus intenses pendant la période Mésozoïque (de 252 à 66 millions d'années), par l'apparition de l'entomophilie (la pollinisation par les insectes) et lors de l'apparition des plantes à fleurs (angiospermes). Les insectes peuvent agir sur les plantes de manière négative en ravageurs, ou positive comme garde du corps (rôle de protection), dispersants ou engrais pour les plantes, tandis que les plantes fournissent une ressource alimentaire/énergétique ou un lieu de nidification pour les insectes.



Fig. 1 : Les insectes, source de nourriture. Ici un gecko ayant gobé un termite.
© Paul-André Calatayud

Les insectes sont ancrés dans les écosystèmes terrestres depuis plus de 400 millions d'années. Ils représentent environ la moitié de tous les organismes vivants connus décrits et les trois quarts du règne animal (1). E. O. Wilson, entomologiste de notoriété mondiale spécialiste des fourmis, les a appelés « les petites choses qui font tourner le monde », en anglais « *Little things that run the world* » (2). Il ne fait aucun doute que les insectes constituent, par leur abondance, leur diversité et leur adaptabilité, une composante essentielle de la vie sur terre. Ils permettent le maintien et l'équilibre dynamique des écosystèmes grâce aux services qu'ils fournissent, tels que la pollinisation, l'herbivorie et la détritivorie, le cycle des nutriments, la lutte contre les

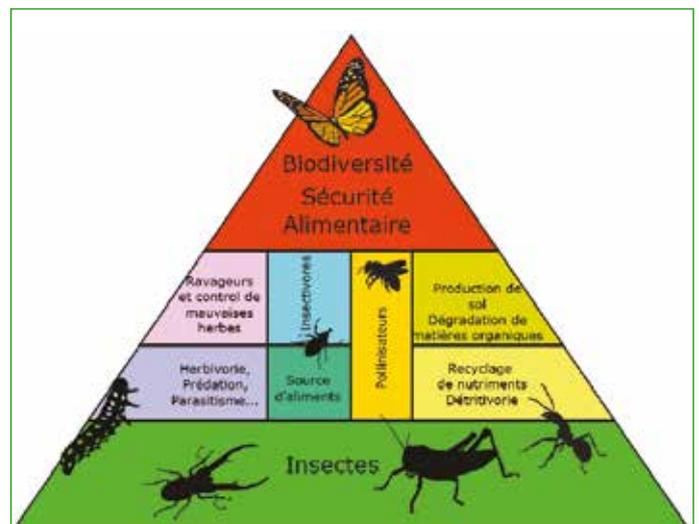


Fig. 2 : Les insectes jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes (3).
© United Nations Environment Programme



Fig. 3 : Inclusion dans l'ambre d'un Diptère fossilisé.
© Paul-André Calatayud

ravageurs et la fourniture de sources de nourriture pour les oiseaux, les mammifères et les amphibiens (3) (Fig. 1). L'approvisionnement et la sécurité alimentaire dépend ainsi de manière cruciale des services écosystémiques fournis par les insectes (Fig. 2).

INTERACTIONS INSECTES-PLANTES, UNE HISTOIRE ANCIENNE

De nombreuses fossiles (Fig. 3) ont permis de reconstituer l'histoire des relations entre les plantes et les insectes sur terre. Les caractéristiques morphologiques des pièces buccales des insectes fossilisés ont, par exemple, fourni des informations précieuses sur leurs modes d'alimentation et des traces irréfutables de phytophagie sur les plantes fossilisées ont ainsi pu être mises en évidence (4). Grâce aux progrès rapides de l'analyse de l'ADN, la phylogénie¹ liée et confrontée aux données paléontologiques a pu fournir des hypothèses solides sur l'origine et la diversification de nombreux insectes, et même sur l'origine des interactions plantes-insectes (4). Les insectes sont apparus au cours de la période Silurienne, après les plantes terrestres (il y a 430 millions d'années). Ils ont commencé la phytophagie/herbivorie à la fin de cette période et au début de la période Dévonienne, c'est-à-dire il y a environ 420 millions d'années (5) (Fig. 2). Dès l'apparition des plantes à fleurs, la pollinisation par les insectes a ensuite joué un rôle essentiel dans la diversification des plantes au cours de la période Mésozoïque (il y a 252 à 66 millions d'années). La pollinisation est une innovation majeure dans l'évolution des interactions plantes-insectes (4). Les



Fig. 4 : Trompe du papillon sphinx *Macroglossum stellatarum* adaptée pour l'éperon de fleurs de valériane des jardins. © Jean Pierre Bouley

insectes ont échappé à au moins quatre phénomènes d'extinction massive d'êtres vivants sur terre ; en ce sens on peut dire qu'ils ont vu la naissance et la mort des dinosaures, pour finalement apparaître aujourd'hui comme nous les connaissons.

Il existe en général un lien étroit entre la plante et son utilisation avec l'espèce d'insecte associé, ce que l'on appelle le concept de « conservatisme phylogénétique » et qui résulte d'un processus de coévolution entre les communautés d'insectes pollinisateurs et les communautés de plantes (4). Par exemple, un parallèle a été établi entre les pièces buccales des pollinisateurs et la morphologie des fleurs, définit comme syndrome de pollinisation et illustré pour la trompe du papillon sphinx dans la Figure 4. Un cas emblématique illustrant ce syndrome, mais cette fois-ci côté plante, est sans doute celui des Orchidées (4). Ces plantes ont en commun une structure particulière (la pollinie) permettant le transport par un seul insecte de très nombreux grains de pollen qui se colle sur la tête du pollinisateur qui lui rend visite. Les Orchidées se sont ainsi adaptées au comportement des insectes pollinisateurs sans influencer de manière majeure leur évolution.

La chimie des plantes a aussi largement marqué la diversification des insectes. Les métabolites secondaires qui caractérisent chaque espèce végétale sont des molécules relativement complexes et dont la signification biologique est souvent précise pour les insectes (5). Les insectes phytophages ont ainsi à leur disposition dans

leur plante hôte une source de molécules peu coûteuses, puisque la structure de base a été synthétisée par la plante, et avec une signification potentiellement très diverse sous réserve de pouvoir les manipuler. Cette source végétale en métabolites secondaires sert aux insectes à communiquer entre eux (cf. communication chimique) et à se défendre contre leurs prédateurs. Il n'est donc pas étonnant qu'un grand nombre d'espèces d'insectes phytophages aient exploité ces molécules pour survivre dans un environnement complexe, et que des relations spécifiques se soient établies entre eux et les plantes. La chimie des plantes a ainsi, par exemple, façonné la diversification et le rayonnement de certains coléoptères africains associés aux graines de légumineuses (5). Outre cette spécialisation chimique dans les interactions insectes-plantes, il existe également une « spécialisation écologique » c'est-à-dire un lien étroit entre les conditions environnementales/les habitats avec la répartition/colonisation des espèces végétales et des insectes associés (4).

ACTIONS NÉGATIVES DES INSECTES DANS LES INTERACTIONS AVEC DES PLANTES : LA PHYTOPHAGIE

Les actions négatives auxquelles on pense au premier abord concernent le rôle notable des insectes dans les ravages de cultures et souvent leur caractère invasif. Trois étapes majeures contribuent à la dynamique d'invasion de ces ravageurs : l'introduction (accidentelle ou pas) d'une ou plusieurs population(s) exotique(s) dans une nouvelle aire, l'établissement de populations viables, et leur prolifération et intégration dans l'aire d'introduction avec d'éventuels impacts (6). Globalement, on estime que ces insectes invasifs coûtent à l'économie mondiale 1,4 trillion de d' US\$ par an (3).

Parmi les plus célèbres insectes ravageurs invasifs figurent :

- Le puceron, *Daktulosphaira vitifoliae*, plus connu sous le nom du Phylloxera de la vigne.
- La mouche blanche (*Bemisia tabaci*), attaquant plus de 1000 plantes cultivées diverses sur tous les continents.
- Deux longicornes asiatiques (*Anoplophora glabripennis*, et *A. chinensis*) introduits accidentellement en Amérique du Nord et en Europe, représentant des menaces graves pour l'arboriculture fruitière, les pépinières et les forêts.
- Le tigre du platane (*Corythucha ciliata*) introduit accidentellement en Europe.
- La mouche des fruits (environ 250 espèces), une des familles d'insectes rassemblant d'importants ravageurs préjudiciables aux filières fruitières et maraî-

chers dans les zones tropicales, et spécialement dans la zone afrotropicale.

- La teigne guatémaltèque de la pomme de terre (*Tecia solanivora*) en Amérique Centrale et du Sud constituant un exemple d'invasion rapide et dévastatrice pour une production agricole majeure.
- Le charançon rouge du palmier (*Rhynchophorus ferrugineus*) arrivé en France en 2006.
- Le puceron du soja en Amérique du Nord (*Aphis glycines*), natif d'Asie.
- L'eudémis (*Lobesia botrana*) et la cochylys (*Eupoecilia ambiguella*), importants ravageurs de tout le vignoble européen.
- La cochenille du manioc (*Phenacoccus manihoti*), originaire d'Amérique du Sud et envahissant les champs cultivés de manioc en Afrique sub-saharienne puis en Asie.
- Plus récemment la légionnaire d'automne (*Spodoptera frugiperda*), originaire des Amériques et envahissant les champs cultivés de maïs en Afrique subsaharienne dès 2016-2017 et plus récemment en Asie.

Cependant, beaucoup d'autres interactions, trophiques ou même non trophiques, peuvent influencer la phytophagie des plantes par les insectes (7) Ces interactions sont liées à la complexité et à la diversité de la faune et de la flore qui se trouvent dans différents écosystèmes. Les plantes et les insectes possèdent des réseaux alimentaires propres qui sont caractérisés par des propriétés liées à l'identité des organismes et à l'organisation des liens qu'ils développent entre eux, ce qui souligne la complexité de leurs réseaux alimentaires. Les insectes peuvent être des proies (par exemple, d'autres insectes ou d'oiseaux), parasités, ou en concurrence avec d'autres insectes pour les ressources. Côté plantes, un habitat homogène caractérisé par l'absence d'une diversité végétale autour de la plante cible facilite la phytophagie alors qu'un habitat hétérogène où la plante cible est « noyée » dans une végétation abondante et diverse est plus difficile à localiser par les insectes phytophages. Tous ces facteurs et interférences sont autant de paramètres qui peuvent influencer la phytophagie des insectes (7).

ACTIONS POSITIVES DES INSECTES DANS LES INTERACTIONS AVEC LES PLANTES : POLLINISATION, LUTTE BIOLOGIQUE ET DÉTRITIVORIE

N'oublions pas que l'agriculture sous sa forme actuelle ne pourrait pas exister sans les insectes qui, à travers plusieurs activités clés, sont essentiels pour le maintien des fonctions et des services écosystémiques non seulement dans les écosystèmes naturels mais aussi dans ceux anthropisés.

La pollinisation

Une récente étude intergouvernementale des services de pollinisation (3) a conclu que 75% de nos cultures vivrières et près de 90% des plantes sauvages à fleurs dépendent de la pollinisation, en grande majorité par des insectes et pour la plupart des abeilles (plus de 20 000 espèces dans le monde). Selon l'IPBES, des estimations mondiales de la valeur économique totale des services de pollinisation pour l'agriculture vont de 160 à 689 milliards d'US\$ par an (8). La production mondiale de cultures chuterait de 3 à 8% en l'absence de pollinisateurs, ce qui intensifierait la demande de terres agricoles. Cependant, les estimations de l'IPBES ne prennent pas en compte le déclin des abeilles « sauvages », et d'autres pollinisateurs, qui pourrait constituer une menace encore plus alarmante pour les écosystèmes naturels, et même pour le rendement des cultures que la perte des abeilles « domestiques » (3). Parmi les autres pollinisateurs jouant un rôle moins important figurent les mouches (en particulier les mouches volantes), les papillons de jour et de nuit, les coléoptères, les guêpes, les thrips et les fourmis. Une diminution de l'abondance des pollinisateurs serait donc également préjudiciable aux espèces végétales sauvages (3), et la réduction drastique de la quantité de graines de celles-ci pourrait induire une autre vague d'extinction.

Contrairement à la pollinisation, les autres services écosystémiques (contrôle des ravageurs et des espèces envahissantes, décomposition et cycle des éléments nutritifs, maintien de la structure et de la fertilité des sols) fournis par les insectes sont souvent difficiles à relier directement aux produits de consommation, et sont donc plus difficiles à évaluer en termes monétaires mondiaux. Leurs effets sont diffus et ne peuvent être mesurés que dans des cas exceptionnels où l'absence du service en question a été suffisamment grave pour justifier une réponse concertée.

La lutte biologique

Les insectes comme les guêpes (Fig. 5) et les mouches sont des travailleurs invisibles de chaque exploitation agricole. Elles sont rarement remarquées, mais elles contrôlent naturellement les ravageurs des cultures sans que cela ne nous coûte quoi que ce soit. Sans eux, les cultures seraient dévastées, le bétail serait malmené et la dépendance vis-à-vis des produits agrochimiques, avec tous les coûts environnementaux et financiers que cela entraînent, serait ruineuse. Il a été estimé que l'activité de biocontrôle naturelle des insectes seraient efficace contre 99 % des ravageurs potentiels (3).

Par exemple, on estime que la guêpe Braconidae (*Cotesia flavipes*), importée en Afrique de l'Est pour lutter contre



Fig. 5 : La guêpe parasitoïde *Cotesia sesamiae* utilisée pour lutter contre les foreurs de céréales en Afrique.

la pyrale exotique envahissante du maïs (*Chilo partellus*) dans les années 1990, a sauvé les moyens de subsistance de plus de 130 000 agriculteurs de la région (3). L'analyse coût-bénéfice suggère que le bénéfice économique sur une période de 20 ans de cette minuscule guêpe a été de 183 millions de dollars au Kenya et de 39 millions de dollars en Zambie, y compris les économies sur les insecticides. Citons également le contrôle de la cochenille du manioc (*P. manihoti*), un autre ravageur exotique en Afrique sub-saharienne. Cette cochenille a menacé les moyens de subsistance de 200 millions d'agriculteurs en Afrique dans les années 1980, bien qu'elle fût pratiquement inconnue à l'époque dans son Amérique du Sud natale où elle était naturellement contrôlée, entre autres, par une guêpe Encyrtidae, *Anagyrus lopezi*. L'introduction de cette guêpe en Afrique comme agent de lutte biologique contre cette cochenille a entraîné des bénéfices estimés sur 40 ans jusqu'à 37 milliards de US\$ (3).

Non seulement les insectes sont utilisés en lutte biologique pour protéger les cultures des insectes ravageurs mais également pour le contrôle de mauvaises herbes envahissantes, comme dans le cas de la jacinthe d'eau envahissante en Afrique (*Eichhornia crassipes*). Cette plante native d'Amérique du Sud, en particulier d'Amazonie, a pu être contrôlée depuis 1991 en Afrique par des lâchers réguliers d'insectes sud-américains : les charançons (*Neochetina eichhorniae* et *N. bruchi*) et le papillon de nuit (*Sameodes albiguttalis*) dont les larves s'alimentent goulûment de cette plante (3).

La détritivorie

Le service le plus répandu fourni par les insectes, et peut-être le plus sous-estimé, est leur rôle dans le développement et le maintien de la structure et de la fertilité du sol. Ils décomposent les débris végétaux et animaux, en transformant la biomasse et en libérant les

éléments nutritifs qui facilitent la croissance des plantes, en empêchant l'accumulation de fumier et les problèmes de ravageurs du bétail qui en découlent, en améliorant la structure du sol, en réduisant les pertes d'azote dues à l'érosion et à la volatilité, et en augmentant le stockage du carbone et de l'eau dans le sol (3). Il a été estimé que les services fournis aux États-Unis par les bousiers (coléoptères coprophages) s'élèvent à 380 millions US\$ par an. En Australie, où les coléoptères indigènes n'ont pas été en mesure de faire face à la bouse produite par le bétail introduit sur cette île, on estime que l'introduction d'une seule espèce de coléoptères de fumier à enfouissement profond (comme *Bubas bison*) a amélioré la production de pâturages de 30 % (3). Les bousiers ne sont qu'un petit composant de tous les taxons d'insectes qui permettent le recyclage rapide et efficace des nutriments, et les déjections animales sont un composant mineur de tous les apports organiques dans ce processus de l'écosystème. Parmi les autres insectes pertinents, on peut citer aussi les termites, les fourmis, les mouches, les cafards et les collemboles.

CONCLUSIONS

Les insectes représentent environ la moitié de tous les organismes vivants connus. Beaucoup d'entre eux interagissent avec les plantes par leur phytophagie mais beaucoup d'autres jouent un rôle clé dans le maintien des espèces végétales sur terre assurant leur reproduction (pollinisation), leur protection (garde du corps contre d'autres insectes phytophages) et leur croissance (apport de nutriments). Leur disparition entraînerait une issue fatale au monde végétal et aux écosystèmes terrestres en général.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'UNEP et M. Jean-Pierre Bouley, directeur de recherche honoraire au CNRS, pour m'avoir autorisé à utiliser respectivement la figure 2 et la photographie de la figure 4.

RÉFÉRENCES

- (1) Schoonhoven LM *et al.* (2005) *Insect-Plant Biology*. Oxford University Press, Oxford, 440 p.
- (2) Wilson EO (1987) The Little Things That Run the World (The Importance and Conservation of Invertebrates). *Conservation Biology*, 1 : 344-346.
- (3) Gordon I *et al.* (2019) We are losing the "Little things that run the world". UN Environment Foresight Brief 11: 1-9, United Nations Environment Programme.
- (4) Schatz B *et al.* (2017). Plant-Insect Interactions: a Paleontological and an Evolutionary Perspective. Sauvion N, Calatayud P-A, Thiéry D (Volume Eds), *Advances in Botanical Research series: Vol 81. Insect-Plant Interactions in a Crop Protection Perspective* (pp. 1-24). Elsevier, GBR.
- (5) Bermudez-Torres K *et al.* (2013) Exploitation des métabolites secondaires de la plante hôte. Sauvion N, Calatayud P-A, Thiéry D, Marion-Poll F (Volume Eds), *Interactions insectes-plantes* (pp. 279-294). Quae & IRD, FR.
- (6) Roques A *et al.* (2013) Les bio-invasions d'insectes. Sauvion N, Calatayud P-A, Thiéry D, Marion-Poll F (Volume Eds), *Interactions insectes-plantes* (pp. 33-56). Quae & IRD, FR.
- (7) Corcket E *et al.* (2017). Food webs and multiple biotic interactions in plant-herbivore models. Sauvion N, Calatayud P-A, Thiéry D (Volume Eds), *Advances in Botanical Research series: Vol 81. Insect-Plant Interactions in a Crop Protection Perspective* (pp. 111-137). Elsevier, GBR.
- (8) IPBES, 2016. The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production. S.G. Potts, V. L. Imperatriz-Fonseca, and H. T. Ngo, (eds). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 552 pages.

NOTE

1 La phylogénie ou phylogénèse permet de reconstituer l'évolution des organismes vivants à l'aide d'un arbre phylogénétique ou arbre évolutif, un diagramme de ramification ou « arbre » montrant les relations évolutives déduites entre diverses espèces biologiques ou autres entités sur la base des similitudes et des différences de leurs caractéristiques génétiques.

Santé des forêts : menace croissante des maladies émergentes



Marie-Laure Desprez-Loustau, directrice de recherche INRAE (aujourd'hui chargée de mission), membre correspondant de l'Académie d'agriculture, est spécialiste de pathologie forestière. Ingénieur agronome AgroParisTech, avec un DEA de pathologie végétale, elle a réalisé une thèse de docteur-ingénieur au laboratoire de pathologie forestière à l'Inra de Nancy. Après son recrutement comme chargée de recherche à l'Inra, elle a été affectée en 1984 à Bordeaux pour créer une nouvelle équipe de pathologie forestière maintenant intégrée à l'UMR BIOGECO. L'objectif des recherches est de comprendre les interactions entre arbres, champignons pathogènes et environnement, avec une approche écologique, épidémiologique et évolutive, afin de maintenir et favoriser la résistance des peuplements forestiers aux maladies.

Résumé : Les forêts couvrent presque un tiers de la superficie terrestre au niveau mondial (17 millions ha en France métropolitaine) et abritent la plus grande part de la biodiversité terrestre. Elles jouent un rôle inestimable dans la santé de la planète et des populations humaines, via les cycles de l'oxygène, du carbone et de l'eau, la fourniture de matériau et d'énergie, et bien d'autres « services », sans compter leur effet direct sur le bien-être humain. La santé des forêts est donc un enjeu majeur. Les forêts d'aujourd'hui sont constituées d'arbres dont les ancêtres ont survécu à de nombreuses adversités au cours de l'évolution. Cependant, elles sont de plus en plus menacées par divers fléaux liés aux activités humaines (surexploitation aboutissant à la déforestation, dépérissements massifs liés aux changements climatiques). Cet article se focalise sur les menaces liées aux maladies émergentes. En quoi sont-elles un nouveau problème ? Quelles en sont les causes ? Comment y faire face ?

MALADIES ÉMERGENTES EN FORÊT

Les arbres sont exposés à une grande diversité d'agents pathogènes au cours de leur vie. Au cours de l'évolution, la sélection naturelle a favorisé l'apparition de mécanismes génétiques de résistance. Le séquençage récent du génome du chêne a ainsi mis en évidence une expansion des gènes de résistance aux maladies chez cette espèce et chez les arbres en général par rapport aux plantes herbacées (1). La sévérité des maladies en populations naturelles est généralement limitée à des situations locales ou épisodiques. Par exemple, les fontes de semis (associées à des pathogènes du sol comme les *Pythium* ou les *Fusarium*) peuvent causer des mortalités très importantes dans les premiers stades de régénération des espèces forestières.

A la différence de ces maladies dites endémiques, des épidémies forestières dévastatrices, affectant des essences sur l'ensemble de leur aire et parfois sur plusieurs continents, sont parfois observées. L'oïdium du chêne (Fig. 1), qui nous est aujourd'hui familier, est apparu en Europe au début du 20^e siècle à cette époque, les symptômes étaient si spectaculaires que les forestiers ont craint pour la survie des chênes. Les chênes tauzins en Piémont pyrénéen ont subi de très fortes mortalités et ont fortement décliné. Toutefois, la maladie a eu un impact modéré sur les chênes pédonculés et sessiles où elle se comporte maintenant comme une maladie endémique. Une autre épidémie catastrophique est celle causée par l'agent de chancre *Cryphonectria parasitica* chez le châtaignier aux Etats-Unis (Fig. 1). En une quarantaine d'années, la maladie, observée pour la première fois dans un parc à New York en 1904, a conduit à la quasi-disparition du châtaignier, qui dominait autrefois les forêts de la côte Est (plusieurs milliards d'arbres tués). Le même champignon a été introduit en Europe, où il s'est répandu largement, mais où les dégâts ont été beaucoup moins sévères (quoique notables) du fait d'une moindre sensibilité des châtaigniers européens par rapport aux châtaigniers américains et de la présence d'un virus limitant l'agressivité du champignon. La graphiose de l'orme est un autre exemple d'épidémie dévastatrice à l'échelle continentale, ayant causé la quasi-disparition des ormes (en tant qu'arbres de belles dimensions) en Europe et en Amérique du Nord. De façon plus récente, on peut citer la chalarose des frênes, apparue pour la première fois dans les années 1990 en Pologne et qui s'est étendue depuis à la quasi-totalité de l'aire des frênes, causant de fortes mortalités (Fig. 1).

L'exemple de l'oïdium du chêne montre que les « nouvelles maladies » forestières ne sont pas un phénomène



Fig. 1 : Quelques maladies forestières d'émergence plus ou moins récente. De gauche à droite et de haut en bas : oïdium du chêne (*Erysiphe* spp), chancre du châtaignier (*Cryphonectria parasitica*), chalarose du frêne (*Hymenoscyphus fraxineus*), encre du chêne rouge (*Phytophthora cinnamomi*), *Diplodia sapinea* sur pins, *Phytophthora ramorum* sur *Rhododendron*. ©Marie-Laure Desprez-Loustau

récent. La pathologie forestière a été marquée depuis longtemps par l'apparition et le développement épidémique de nouvelles maladies (2). La nouveauté est l'accélération du taux d'apparition de ces nouvelles maladies dans les dernières décennies, phénomène également observé dans les populations animales et même humaines, depuis l'épidémie de Sida à la fin des années 1970 jusqu'à celle de Covid-19 aujourd'hui. Ces pandémies sont un révélateur de l'existence de réservoirs de pathogènes encore inconnus et du rôle clé des activités humaines dans leur développement, et ont conduit au concept de maladie émergente largement partagé par les épidémiologistes médecins, vétérinaires et de plantes. On définit comme émergente une maladie dont les cas augmentent soudainement dans une population, qu'il s'agisse d'une maladie jamais décrite auparavant, ou qui résulte de l'évolution d'un agent pathogène déjà connu, ou d'une maladie connue se propageant dans de nouvelles populations ou régions géographiques.

ÉVOLUTION RÉCENTE EN FRANCE ET EN EUROPE DE MALADIES EN FORÊT : FACTEURS D'ÉMERGENCE

L'analyse des données historiques montre que le rythme d'apparition de « nouvelles épidémies » en forêt a fortement accéléré au cours des 2 derniers siècles, passant en France d'environ une émergence tous les 11 ans avant 1975 (déjà élevé en considérant la pression sur les écosystèmes) à moins de 6 ans depuis cette date. Pour l'Europe, le nombre de pathogènes forestiers dits envahissants (à l'origine d'une nouvelle maladie dans un pays donné, donc correspondant à la définition d'émergents) a augmenté de façon exponentielle pour la période 1800-2008 (Fig. 2).

Une grande partie de ces pathogènes forestiers émergents est d'origine non européenne et résulte d'introductions (42%), les pathogènes indigènes ne causant que 28% (beaucoup ont une origine inconnue). Le nombre

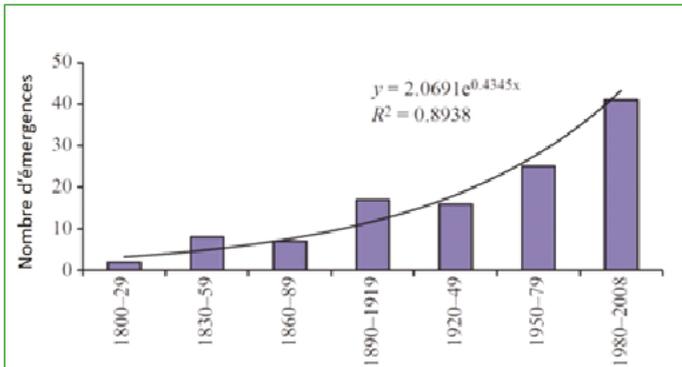


Fig. 2. : Evolution temporelle de maladies forestières émergentes décrites en Europe (3).

de pathogènes forestiers envahissants est corrélé positivement à l'activité commerciale internationale de chaque pays. Comme déjà montré au niveau mondial pour les maladies émergentes de plantes et d'animaux (à partir de la base de données ProMed : <https://www.promedmail.org>), l'introduction de pathogènes hors de leur aire de distribution naturelle apparait comme le premier facteur d'émergence de maladie. Les autres causes identifiées sont l'évolution des pathogènes, l'influence du climat, ou les changements de pratiques (agricoles ou sylvicoles). Ainsi, les facteurs d'émergence de maladies sont très directement liés aux activités humaines et elles peuvent être considérées comme un symptôme du changement global.

EMERGENCES ET INVASIONS

Les épidémies dévastatrices évoquées précédemment d'oïdium du chêne, de chancre du châtaignier, de graphiose de l'orme ou de chalarose du frêne sont toutes causées par des champignons exotiques, c'est-à-dire non originaires des régions où ils causent ces épidémies et introduits par les activités humaines. L'histoire de l'oïdium du chêne, en particulier l'origine de l'agent causal, est longtemps restée une énigme mais l'utilisation d'outils moléculaires et d'échantillons d'herbiers a récemment permis de mettre en évidence qu'il s'agissait d'une triple invasion d'espèces proches du genre *Erysiphe*, *E. alphitoides*, *E. quercicola* et *E. hypophylla*, probablement d'origine asiatique (4). La voie d'introduction de ces espèces en Europe reste inconnue. Dans le cas du chancre du châtaignier, le champignon responsable est également d'origine asiatique et son introduction est liée à l'importation de châtaigniers japonais aux États-Unis. De même, *Hymenoscyphus fraxineus*, l'agent de la chalarose des frênes a très probablement été introduit en Europe via des plants de frênes asiatiques porteurs du champignon.

Ces quelques exemples illustrent plusieurs points caractéristiques de maladies émergentes forestières, en premier lieu la part importante et croissante jouée par les parasites d'origine exotique. Ceux-ci sont à l'origine de sept des 13 maladies forestières les plus courantes et dommageables en France, d'après la base de données du Département santé des forêts (DSF) (<https://agriculture.gouv.fr/le-departement-de-la-sante-des-forets-role-et-missions>) (Fig. 3).

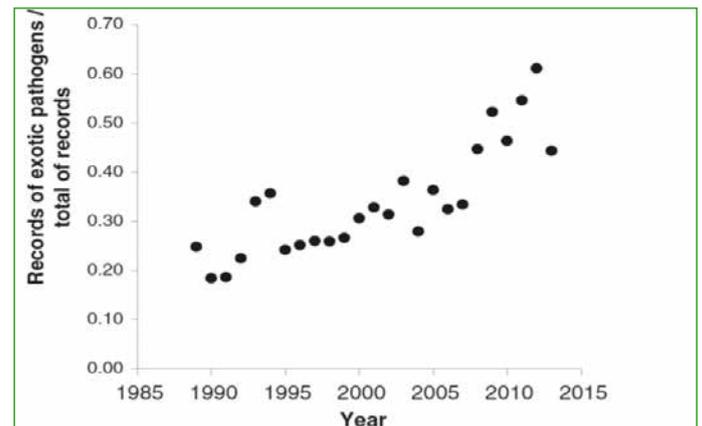


Fig. 3. : Evolution temporelle de la part des mentions de maladies causées par des parasites d'origine exotique dans la base du DSF (5).

L'impact croissant des pathogènes d'origine exotique s'explique par l'augmentation du commerce, en particulier des plants à usage forestier, ornemental ou paysager, qui est à l'origine de l'introduction et de la dissémination de nombreux agents pathogènes forestiers au niveau mondial. L'invasion de *Phytophthora ramorum* en Europe en est un autre exemple. Cet organisme, probablement d'origine asiatique, s'est répandu dans toute l'Europe via le commerce des rhododendrons en pépinières ornementales. De là, il s'est « échappé » en parcs et jardins puis en milieu naturel au Royaume Uni (où les rhododendrons ont envahi de nombreux paysages) (Fig. 1), et a fini par causer des mortalités massives en plantations de Mélèzes. Le même pathogène, introduit de façon indépendante en Amérique du Nord, est à l'origine de la « Sudden Oak Death » (SOD, mort subite des chênes). Avant ces épidémies, l'espèce *P. ramorum* n'était pas décrite et son réservoir naturel reste inconnu.

De nombreux pathogènes de maladies forestières émergentes changent d'espèce hôte au cours de leur introduction dans un nouveau continent, passant d'un hôte avec lequel ils ont coévolué et sur lequel ils causent peu de symptômes (châtaigniers japonais et chinois, ou frênes de Mandchourie par exemple) à une nouvelle espèce « naïve » (jamais rencontrée) qui s'avère particulièrement sensible (châtaignier américain ou frênes euro-

péens). *H. fraxineus*, l'agent de la chalarose en Europe, avait été décrit précédemment sous un autre nom au Japon, mais comme simple saprophyte des feuilles. La faible efficacité de l'immunité des arbres confrontés à de nouveaux pathogènes pourrait s'expliquer par les mécanismes impliqués, qui nécessitent la reconnaissance de motifs microbiens pour déclencher les réactions de défense (cf. articles de S. Gianinazzi, page 36 et de G. Pelletier, page 41).

Ainsi, beaucoup de maladies émergentes, associées aux introductions d'agents pathogènes, peuvent être considérées comme une forme d'invasion biologique. Il est intéressant de noter que ces invasions contredisent le postulat du cosmopolitisme des microbes, selon la formule « *everything* [en parlant des microbes par opposition aux plantes et animaux] *is everywhere* », ce qui suppose des capacités de dispersion naturelle sans limites de ces organismes (5). Cette idée fautive peut s'expliquer par la difficulté de différencier des espèces proches dans le cas des microbes. Ainsi la chalarose des frênes avait été au départ attribuée à des mutants virulents de l'espèce européenne *H. albidus* (ne causant aucun dommage sur les arbres), qui n'est distinguable de *H. fraxineus* que par des marqueurs moléculaires. Des études récentes montrent que d'autres espèces d'*Hymenoscyphus* très proches morphologiquement sont présentes sur les frênes d'Asie, constituant des menaces potentielles pour les frênes européens. De même, les chênes asiatiques hébergent d'autres espèces d'*Erysiphe* que celles déjà présentes en Europe.

Les définitions et concepts développés en écologie des invasions s'appliquent aux maladies émergentes causées par des pathogènes introduits. Invasions et émergences se caractérisent par une succession d'étapes depuis l'introduction (par les activités humaines) d'individus d'une espèce hors de son aire naturelle, l'établissement d'une population (aptitude à se multiplier sans intervention humaine), la dissémination, puis éventuellement l'impact sur les populations résidentes. Comme dans le cas des organismes invasifs animaux ou végétaux, les pathogènes introduits à l'origine de maladies émergentes se trouvent préférentiellement dans certains groupes taxonomiques, comme les *Phytophthora* ou les oïdiums. Ils possèdent certaines caractéristiques de reproduction, de modes de dispersion à longue distance, ou de réponse à la température, qui sont associées à leur « succès invasif » (6). Le concept de succès invasif est au cœur de l'analyse du risque phytosanitaire, uti-

lisée pour le classement des organismes réglementés ou de quarantaine (7 ; cf. article de F. Petter & M. Suffert page 46).

Réciproquement on peut se demander ce qui fait la « vulnérabilité à l'invasion » ou son inverse « la résistance biotique » des forêts, c'est-à-dire leur probabilité d'être affectées par une maladie émergente. Un facteur majeur de vulnérabilité est lié à l'importance de voies possibles d'entrée des pathogènes : distance et voies de transport depuis ports ou aéroports, densité du réseau routier, de pistes et chemins de randonnées, etc... La diversité des forêts n'est pas une garantie de résistance à l'invasion de pathogènes mais peut favoriser leur résilience. Les invasions de *Phytophthora cinnamomi* affectant de nombreuses plantes endémiques en Australie, l'épidémie de la mort soudaine des chênes en Californie, ou la disparition du châtaignier suite à l'introduction de *C. parasitica* dans l'Est des Etats-Unis, progressivement remplacé par d'autres espèces, en sont des illustrations.

AUTRES D'ÉMERGENCES DUES AU CLIMAT ET PRATIQUES

Le facteur climat vient bien après les introductions de pathogènes comme cause directe d'émergence de maladie, et souvent en interaction avec ces dernières. Ainsi l'expansion de la maladie de l'encre du chêne et du châtaignier en Europe causée par *P. cinnamomi* (parasite d'origine tropicale très sensible au gel - Fig. 1) est favorisée par l'augmentation des températures, en particulier hivernales (Fig. 4). Le groupe des Botryosphaeriaceae contient de nombreuses espèces de champignons dits pathogènes opportunistes, qui peuvent rester à l'état

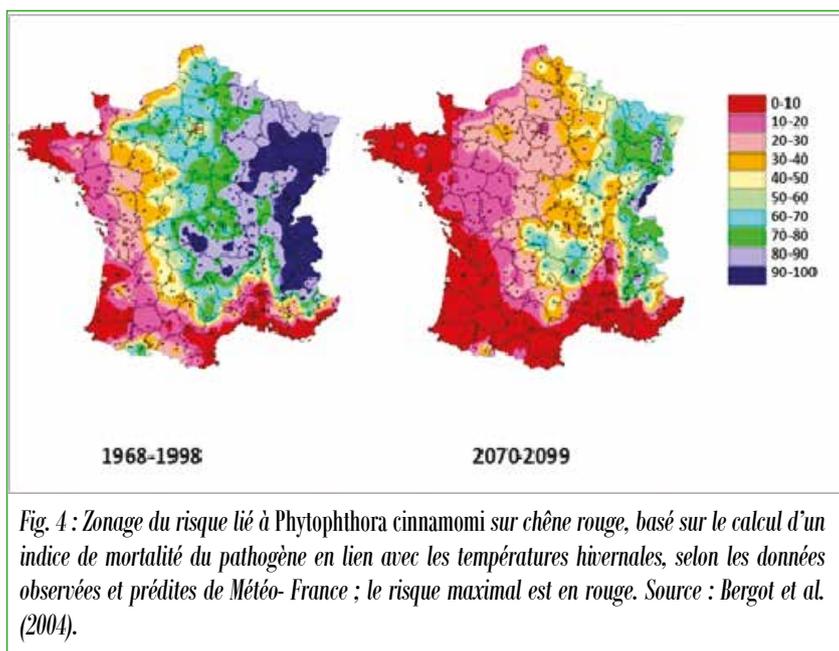


Fig. 4 : Zonage du risque lié à *Phytophthora cinnamomi* sur chêne rouge, basé sur le calcul d'un indice de mortalité du pathogène en lien avec les températures hivernales, selon les données observées et prédites de Météo- France ; le risque maximal est en rouge. Source : Bergot et al. (2004).

latent, sans causer de symptômes, tant que leur hôte est en bon état physiologique (stade dit endophyte) et devenir pathogènes quand leur hôte subit un stress, notamment hydrique. C'est par exemple le cas de *Diplodia sapinea* (Fig. 1).

Les changements de pratiques sont une autre cause importante de maladies émergentes (rappelons le cas de la maladie de la « vache folle », émergé suite à une modification des processus industriels de fabrication des farines animales). Dans le domaine forestier, il peut s'agir de l'utilisation de nouvelles espèces ou variétés en plantations. L'explosion dans les dernières décennies de *Diplodia sapinea* sur les pins d'Europe peut s'expliquer à la fois par des conditions climatiques plus favorables à l'expression du pathogène mais aussi à l'expansion des plantations de Pin laricio, un hôte particulièrement sensible favorisant la multiplication et la transmission du champignon (9). Le Pin laricio, originaire de Corse, a été très largement planté dans d'autres régions au cours des dernières décennies, et s'est avéré très sensible non seulement au *Diplodia* mais aussi à la maladie foliaire des bandes rouges, causée par plusieurs espèces de *Dothistroma* (d'origine encore indéterminée). La plantation d'espèces indigènes hors de leur aire naturelle peut également modifier l'équilibre hôte-parasites-environnement en faveur des pathogènes et conduire à l'émergence de maladies, comme observé dans le cas des plantations de mélèzes européens d'origine alpine, sévèrement affectées par le chancre à *Lachnellula* en dehors de leur zone d'origine. Enfin, les pratiques ont une influence directe sur les pathogènes en agissant comme pressions de sélection pouvant favoriser la multiplication de souches plus virulentes (comme pour des bactéries résistantes aux antibiotiques). Le contournement de la résistance complète du peuplier Beaupré à la rouille causée par *Melampsora larici-populina* dans les années 1990 est un cas d'école. Le déploiement excessif d'un seul clone à large échelle (près de la moitié des plants de peuplier vendus pendant quelques années) a exercé une pression de sélection considérable sur les populations du champignon, et dès qu'un mutant contournant cette résistance est apparu, il a eu un avantage considérable et a pu se disséminer très facilement à toutes les peupleraies.

Une autre cause d'émergence de maladie est liée à des pathogènes résultant d'hybridation. Des espèces ayant évolué séparément, mises en contact suite aux échanges internationaux, peuvent s'avérer inter-fertiles et se croiser, donnant naissance à des organismes plus invasifs ou virulents que les espèces parentes. Le *Phytophthora alni*, à l'origine d'une maladie des aulnes qui a émergé dans les années 1990 en Europe en est un exemple. Les pépi-

nières ornementales et forestières, lieux de nombreux échanges de matériel végétal et où les *Phytophthora* trouvent un environnement particulièrement favorable à leur développement, constituent des zones à risque pour l'apparition de tels hybrides.

QUELLES RECOMMANDATIONS TIRER DE L'ANALYSE DES ÉMERGENCES PASSÉES ?

Freiner le plus possible les introductions et la dissémination de parasites

Les réglementations et mesures d'inspection prises pour limiter les risques d'introductions de pathogènes forestiers ne sont pas suffisantes pour contrebalancer l'explosion du commerce international. Un certain fatalisme voudrait que « l'homogénéisation biotique » soit inévitable, mais ce serait au prix d'impacts environnementaux considérables. En particulier, les introductions de parasites sont la menace majeure pour les forêts naturelles ou « semi-naturelles » (constituées d'essences indigènes régénérées naturellement). Même si un contrôle parfait du risque d'introduction est utopique, il reste des marges d'amélioration en adaptant la réglementation (normes et exigences en amont des importations, meilleure ciblage des organismes et filières à risque), en améliorant la détection durant le transport et aux frontières, en augmentant la traçabilité (étiquetage de l'origine des plants). Compte tenu du rôle important du commerce de plants ornementaux comme vecteur d'introduction de parasites en forêt, un effort particulier pourrait commencer par cette filière, en prenant mieux en compte la balance bénéfiques-risques. Une fois les pathogènes établis en forêt, ils deviennent très difficiles à contrôler. La bonne gestion et le contrôle des pépinières, forestières et ornementales, sont donc des priorités.

Être capable de détecter et de faire face : surveillance et expertise

La prévention et le ralentissement des maladies émergentes nécessite des dispositifs d'alerte, de diagnostic et de surveillance efficaces (cf. article de F. Petter & M. Suffert page 46). Les progrès technologiques en analyses d'images et tests moléculaires offrent des perspectives très intéressantes pour la détection et la surveillance. La création récente de la plate-forme d'épidémiologie des maladies végétales (<https://plateforme-esv.fr/>) est également un facteur positif, même si le nombre de maladies forestières prises en compte est encore limité.

Par ailleurs, les émergences sont par définition largement imprévisibles et leur gestion efficace ne peut se baser que sur des connaissances biologiques et écologiques faisant appel à une expertise parfois longue à

acquérir. Pour cela, il est essentiel que la formation à la pathologie forestière, de plus en plus réduite dans nombre de pays dont la France, et le recrutement de chercheurs dans ce domaine soient maintenus.

Favoriser la diversité des forêts

La diversité est une assurance, un frein au développement des épidémies et un moteur d'adaptation vis-à-vis des maladies. Ainsi, l'effet de la densité des frênes sur la propagation de la chalarose a été démontré (10). Les peuplements mélangés et la régénération naturelle, assurant une bonne diversité génétique, doivent donc être favorisés le plus possible. Le recours aux semis limite également le risque lié à l'utilisation de plants infectés.

Nécessité d'une approche intégrée : approche écologique - concept « one health »

L'émergence de nouvelles maladies, notamment humaines, a fait prendre conscience de la nécessité d'approches écologiques et globales (à l'échelle de la planète), exprimée notamment dans le concept « One health » (<http://www.onehealthinitiative.com/>). Concernant plus particulièrement les pathogènes forestiers, une approche écologique est développée depuis longtemps mais des domaines de recherche importants restent ouverts : diversité des parasites et de leurs régulateurs (notamment virus) en forêts naturelles, relation diversité-vulnérabilité à différentes échelles spatiales, évolution de la résistance en peuplements, relation croissance-défense (trade-off), etc... Le projet européen HOMED (<http://homed-project.eu/>), débuté fin 2018, explore ces différentes pistes dans une approche holistique et multi-acteur visant à un meilleur contrôle des maladies émergentes et insectes invasifs menaçant les forêts européennes.

Impliquer le plus grand nombre : éducation, information, sciences participatives

Le développement de nouvelles technologies de communication et des réseaux sociaux sont des atouts pour favoriser non seulement la diffusion de l'information

vers le public ou les professionnels mais aussi la mise en œuvre d'approches participatives. Des applications téléphoniques commencent ainsi à se développer pour associer le public à la « biovigilance » (<http://ephytia.inra.fr/fr/CP/40/Gerer-surveiller>).

RÉFÉRENCES

- (1) Plomion C *et al.* (2018) Oak genome reveals facets of long lifespan. *Nature Plants*, 4 : 440-452.
- (2) Delatour C *et al.* (1985) Histoire et avenir de la pathologie forestière en France. *Revue Forestière Française*, 37 : 65-82.
- (3) Santini A *et al.* (2013) Biogeographical patterns and determinants of invasion by forest pathogens in Europe. *New Phytologist*, 197 : 238-250.
- (4) Gross A *et al.* (2020) Hidden invasion and niche contraction revealed by herbaria specimens in the fungal complex causing oak powdery mildew in Europe. *Biological Invasions*, Doi: 10.1007/s10530-020-02409-z
- (5) Desprez-Loustau ML *et al.* (2016) An evolutionary ecology perspective to address forest pathology challenges of today and tomorrow. *Annals of Forest Science*, 73 : 45-67.
- (6) Philibert A *et al.* (2011) Predicting invasion success of forest pathogenic fungi from species traits. *Journal of Applied Ecology*, 48 : 1381-1390.
- (7) Orłowski AD (2018) Organismes de quarantaine forestiers: analyse des risques et mesures phytosanitaires. *Revue Forestière Française*, 70 : 663-668.
- (8) Bergot M *et al.* (2004) Simulation of potential range expansion of oak disease caused by *Phytophthora cinnamomi* under climate change. *Global Change Biology* 10 : 1539-1552.
- (9) Fabre B *et al.* (2011) Can the emergence of pine Diplodia shoot blight in France be explained by changes in pathogen pressure linked to climate change ? *Global Change Biology*, 17 : 3218-3227.
- (10) Grosdidier M *et al.* (2020) Landscape epidemiology of ash dieback. *Journal of Ecology*, Doi: 10.1111/1365-2745.13383.

Herbiers marins : les enjeux de leur conservation en bonne santé



Christian Hily, chercheur CNRS en écologie marine (1979-2013), est spécialiste des espèces et des habitats benthiques des milieux côtiers. Après des recherches sur l'impact des rejets organiques (effluents urbains ou agricoles, marées noires) sur les invertébrés benthiques, il développe de nouvelles approches utilisant caméras sous-marines tractées et la plongée autonome pour étudier le rôle d'invertébrés filtreurs dans les écosystèmes marins en milieu tempéré et tropical. Il lance ensuite des recherches sur la biodiversité d'herbiers marins et des champs de blocs intertidaux, puis sur l'impact d'espèces exotiques envahissantes sur la biodiversité des estrans. Il s'est aussi impliqué pour identifier les enjeux de la conservation des habitats côtiers et pour la mise en place d'outils de protection (réserves et parcs naturels marins). Retraité en 2014, il a initié et anime aujourd'hui bénévolement un observatoire breton sur les changements de la biodiversité des estrans dans le cadre du Bretagne Vivante-SEPNB.

Résumé : Les phanérogames marines sont des espèces ingénieuses qui constituent des herbiers marins et qui permettent le développement de biocénoses originales et d'une très grande biodiversité. Les herbiers sont des écosystèmes très productifs présentant de nombreux intérêts d'ordre fonctionnel, patrimonial, paysager, scientifique, économique, et pédagogique. Leur installation dans une zone sédimentaire côtière modifie profondément l'ensemble des processus écologiques de cette zone. Malgré les nombreux services écosystémiques qu'ils rendent, les herbiers régressent rapidement presque partout dans le monde sous les multiples impacts directs et indirects des pressions anthropiques locales et globales. Et pourtant les herbiers en bonne santé ont une capacité naturelle pour freiner les impacts induits par le changement climatique : protection du littoral face à la montée du niveau de la mer, séquestration de carbone dans les sédiments qu'ils colonisent, oxygénation par la photosynthèse, frein à l'acidification en modifiant le pH environnant.

Le premier atlas mondial des herbiers marins qui faisait le point sur les herbiers dans le monde, leur diversité, étendue et menaces sur leur santé (1) avait déclenché une première prise de conscience des enjeux considérables sur ces écosystèmes encore trop mal connus. Tout récemment un second rapport (2) fait un constat alarmant sur les dégradations des herbiers marins et leur vulnérabilité face aux multiples atteintes partout dans le monde à l'environnement littoral. En particulier, il attire l'attention des décideurs sur les services écosystémiques des herbiers et leur rôle naturel pour atténuer le changement climatique global en cours. Les herbiers marins sont des prairies constituées des plantes à fleurs marines (phanérogames) d'une très grande biodiversité aux rôles fonctionnels multiples ; leur conservation en bonne santé malgré les pressions anthropiques, dans le

cadre du changement global, est aujourd'hui un enjeu primordial dans le monde.

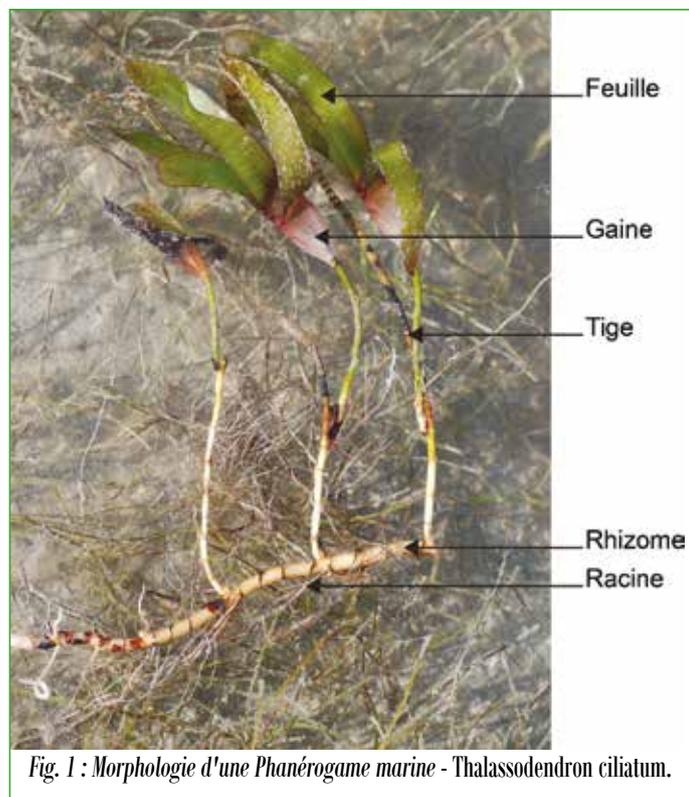
LES PHANÉROGAMES MARINES, DES PLANTES À FLEURS ADAPTÉES AUX MILIEUX MARINS CÔTIERS

Les herbiers marins sont formés par des monocotylédones apparentés avec les Phanérogames de la classe des Magnoliophytes (anciennement les Angiospermes). Les Phanérogames marines possèdent les mêmes organes et tissus que les autres plantes à fleurs : elles produisent des rameaux de feuilles qui se développent dans la masse d'eau, et rhizomes et racines qui s'étendent dans les sédiments meubles (Fig. 1).

Si les phanérogames marines ne sont pas aussi adaptées que les algues pour assurer la photosynthèse en profondeur, certaines espèces peuvent cependant se développer encore à 60 mètres de profondeur dans les eaux les plus claires des zones tropicales. La reproduction asexuée par bouturage naturel de fragments de pieds ou extension des rhizomes est le mode principal de maintien et de régénération des herbiers. Il existe aussi un mode de reproduction sexuée avec pollinisation et fertilisation. La germination des graines, peut être très rapide une fois les graines libérées dans le milieu ; elle peut aussi se réaliser après une période de dormance.

Les phanérogames marines ont colonisé toutes les mers du monde, à l'exception de l'Antarctique. Elles sont présentes sur les côtes de six continents et 159 pays. Actuellement, les herbiers couvrent moins de 10% des zones côtières mondiales, soit 300 000 km² tout au plus. Certaines espèces sont présentes dans toutes les régions du monde, tandis que d'autres sont exclusivement présentes

en zone tempérée (3) ou bien sont pantropicales. *Zostera marina* est l'espèce la plus nordique franchissant le cercle polaire arctique, tandis qu'une autre espèce du même genre, *Z. capensis*, possède la limite la plus méridionale. Certaines espèces sont endémiques, par exemple 13 espèces en Australie et six espèces dans les Caraïbes.



développement végétatif par clones de grande taille, expliquent que ces plantes constituent des populations denses là où elles s'installent (4). Les termes d'herbiers ou de prairies décrivent ainsi la formation d'un paysage marin très caractéristique en taches ou en patch, et couvrant de quelques dizaines de mètres carrés à plusieurs dizaines d'hectares (Fig. 2). La morphologie et la grande densité des pieds de phanérogames marines ne sont pas sans conséquences sur leur environnement. Elles sont ainsi considérées comme des espèces ingénieuses qui modifient le biotope et la biocénose où elles se développent en créant des écosystèmes originaux d'une grande complexité. Ces modifications sont pérennes et suffisamment stables et reproductibles pour que l'identité même de l'habitat sédimentaire change, de non végétalisé comme les « sables fins », « sables grossiers » ou « sables envasés », en « herbier ». Cet habitat possède, en conséquence, des caractéristiques physiques, biogéochimiques et biologiques originales.



Les phanérogames marines ont un fort intérêt patrimonial du fait de la faible diversité des espèces existant au niveau mondial (72 décrites actuellement). La disparition d'une seule espèce correspondrait à près de 0,5 % de la diversité spécifique. Les caractéristiques originales de fonctionnement biologique, mode de reproduction, adaptation au milieu marin en font des curiosités botaniques rares qui méritent un effort de protection systématique. Leur répartition sporadique à l'échelle mondiale, le faible taux d'espèces ubiquistes comparé aux espèces endémiques (à l'échelle de bassins régionaux) renforce cet intérêt. Aux échelles locale et régionale, l'intérêt patrimonial des espèces se renforce puisque le nombre d'espèces y est souvent très faible, par exemple 2 pour l'Atlantique nord-est ou 7 dans le Bassin Caraïbe, et ne dépasse guère la dizaine, le maximum étant probablement atteint en Australie (29 espèces).

DE LA PLANTE MARINE À L'HABITAT « HERBIERS »

Le développement des graines souvent concentrées dans des espaces limités par les courants marins, et surtout le

Des écosystèmes très productifs...

Les herbiers marins font partie des écosystèmes les plus productifs au monde (5). La production primaire est issue de la production des pieds d'herbiers eux-mêmes, mais aussi de la biomasse d'algues associées, fixées sur les feuilles ou se développant sur le sédiment entre les pieds. La biomasse totale est souvent très élevée. Ainsi pour les herbiers de *Posidonia oceanica* en Méditerranée, les biomasses peuvent atteindre 900g de matière sèche (Ms)/m² pour les feuilles et 50g Ms pour les rhizomes et racines, avec jusqu'à 470g Ms/m² d'algues sur les feuilles et jusqu'à 50 Ms d'algues associées aux rhizomes (6). Cette production élevée assure un apport abondant de matière organique, source énergétique de base pour un

réseau trophique souvent très complexe et qui s'étend bien au-delà des limites même de l'herbier.

Les activités métaboliques et la structure des herbiers modifient les conditions physiques et chimiques de l'eau et des sédiments des zones colonisées. La respiration et la photosynthèse modifient les concentrations d'oxygène dans l'eau et dans les sédiments, et qui peut ainsi dépasser 10g d'oxygène m⁻² jour⁻¹. Les herbiers ont également une influence sur le métabolisme du calcaire, d'une part en augmentant la dissolution des carbonates au sein des sédiments et d'autre part en augmentant la précipitation des carbonates due aux algues et autres organismes épibiontes calcaires associés (7). Cependant, les effets des herbiers sur la biogéochimie de l'eau et des sédiments dépendent des espèces végétales elles-mêmes, du fait d'un développement très variable des feuilles, des systèmes racinaires et des rhizomes.

... d'une grande biodiversité spécifique, ...

La structure en trois dimensions de la végétation des herbiers, développée en un réseau inextricable de feuilles, de tiges et de rhizomes, crée une grande diversité de microhabitats ayant chacun sa composition en espèces animales particulières (Fig. 3). Certaines espèces y sont totalement inféodées, d'autres sont présentes en plus grande abondance que dans les autres habitats qu'ils fréquentent naturellement, et enfin beaucoup d'espèces de différents habitats s'y croisent. Certaines sont rares et menacées, et donc de fort intérêt patrimonial. La composition des feuilles est souvent riche en lignine et cellulose, ce qui limite le nombre d'espèces d'herbivores qui peuvent les consommer directement. Ce sont essentiellement de grandes espèces comme les tortues, les mammi-



Fig. 3 : Les herbiers, hot spots de biodiversité : Ici sous la canopée de *Talassodendron ciliatum* (Mayotte).

fères siréniens (le dugong et les lamentins), devenues rares et menacées de disparition à l'échelle mondiale. En plus des espèces animales, les macroalgues épiphytes des feuilles d'herbiers présentent une forte richesse spécifique; les herbiers d'*Amphibolis griffithii* peuvent ainsi supporter jusqu'à 150 espèces différentes. Globalement, on peut considérer que le nombre d'espèces animales présentes dans un herbier est multipliée par un facteur 5 à 10 par rapport aux sédiments non végétalisés à proximité immédiate, tandis que pour les biomasses ce rapport est encore bien plus élevé (8).

... et d'une biodiversité fonctionnelle, ...

De nombreux poissons trouvent abri et refuge parmi la végétation des herbiers: petites espèces et juvéniles se cachent dans les entrelacs de rhizomes et entre les feuilles, profitant du mouvement pour fuir les prédateurs. Pour certaines espèces, les herbiers constituent une zone de ponte et de nurserie, sites privilégiés de reproduction ou encore du développement des juvéniles et leur survie, grâce à l'abondance de petites proies et au couvert végétal dense qui les protège relativement bien des prédateurs. Pour de nombreux poissons carnivores, en revanche, les herbiers abritent de nombreuses proies et constituent ainsi des territoires privilégiés de chasse, majoritairement en période nocturne. Les herbiers ont de multiples liens fonctionnels avec les écosystèmes voisins que ce soient les mangroves et les récifs coralliens (Fig. 4) en zone tropicale, ou les champs d'algues en zone tempérée (9). Chacun d'eux en tire des intérêts en terme de stabilité et de biodiversité.



Fig. 4 : Liens fonctionnels entre coraux et herbiers (Nouvelle Calédonie).

...et qui jouent un rôle bénéfique aux nombreux services écosystémiques

La forte biodiversité et la structure particulière des herbiers leur confèrent différentes fonctions écologiques,

qui sont à l'origine des services écologiques dont l'homme peut tirer des bénéfices directs ou indirects. Ils figurent parmi les écosystèmes naturels fournissant le plus grand nombre de services aux sociétés humaines, rendant les enjeux de leur conservation d'autant plus forts :

- *Services de support* : bioturbation, productivité primaire, productivité secondaire, cycle des nutriments et de minéralisation, cycle de l'oxygène et du carbone.
- *Services de prélèvement* : poissons et crustacés pour l'alimentation, matériaux de construction (cloisons sèches), ressource génétique.
- *Services de régulation* : zone de frayage et de refuge pour les espèces, contrôle des vagues et de l'énergie des courants, régulation de l'érosion et de l'envasement, dynamique de sédimentation nécessaire aux microorganismes et à la faune benthique, stockage de carbone, assainissement de l'eau (diminuant de 50% la présence de bactéries pathogènes).
- *Services culturels* : pêche récréative, préservation de la biodiversité marine pour des raisons éthiques, excursions scolaires, source de connaissance, vue (paysage), plongée sous marine.

LA SANTÉ ET LA SURVIE DES HERBIERS MARINS SONT MENACÉES

Les herbiers marins sont soumis à de nombreuses pressions naturelles et anthropiques, directes et indirectes, locales ou globales. Selon les espèces de phanérogames marines, les seuils de tolérance aux diverses pressions et la résilience sont très variables. Les herbiers marins sont aujourd'hui en déclin sous l'ensemble de pressions détaillées ci-dessous (10). Si on considère qu'ils ont diminué de 10% chaque année entre 1970 et 2000 (11), aujourd'hui on estime cet effondrement à près de 7% par an (1).

Tempêtes et cyclones

Les événements climatiques extrêmes impactent les herbiers par deux voies : le ruissellement des eaux de pluies qui baisse la salinité, augmente la turbidité et apporte polluants et macrodéchets, et l'action des houles de mer. L'érosion sédimentaire créée par les houles exceptionnelles n'épargne pas les herbiers, même s'ils présentent une meilleure résistance qu'aux sédiments nus grâce à leur système racinaire et rhizomateux, et jouent ainsi un rôle tampon contre l'érosion côtière.

La pêche

L'existence de populations d'espèces d'intérêt commercial dans les herbiers (poissons, mollusques, crustacés, oursins) conduit à des pressions fortes de pêche avec des impacts non négligeables sur la biodiversité et sur le biotope « herbier » lui-même, notamment sous l'action des

dragues, chaluts et divers engins traînants. La surpêche peut aussi induire des conséquences dramatiques pour les herbiers car certains poissons herbivores, comme les mugilidés, exercent un contrôle de la biomasse des algues épiphytes des herbiers évitant un effet d'ombrage néfaste pour la photosynthèse. Ce processus, qui est devenu fréquent dans le cas des eaux côtières de plus en plus enrichies en sels nutritifs, peut évoluer jusqu'à une disparition complète des herbiers.

L'extraction de matériaux coralliens ou sableux

Destinés à la construction, elle impacte directement la zone d'herbier, ou indirectement en induisant l'érosion à proximité des secteurs d'extraction, l'augmentation de la turbidité et une hypersédimentation.

Les activités de loisir

L'impact des mouillages et des hélices de bateaux, dans les secteurs où la plaisance est fortement développée, sur les herbiers est un des facteurs les plus néfastes dans les sites touristiques (Fig. 5). Les ancres arrachent les rhizomes et racines tandis que les chaînes arrachent les feuilles. En outre, pour le « bien-être » des touristes, les herbiers sont parfois arrachés des zones de baignade et devant les hôtels avec aménagements de « fonds blancs » et de chenaux pour accéder aux pontons. La fréquentation humaine de zones sableuses, les activités de loisir (planche à voile, kite surf), conduit au piétinement des herbiers.

Les aménagements

Dans les régions les plus touristiques ou à croissance démographique forte, le développement d'infrastructures comme les ports, les ouvrages de défense contre la mer, les plages artificielles à l'avant des hôtels, les chenaux de navigation ou encore les remblaiements pour gagner des surfaces constructibles, se font encore la plupart du temps au mépris des herbiers.

Effluents terrigènes, portuaires, urbains

Comme la plupart des habitats côtiers dans le monde, les herbiers font face depuis plusieurs décennies à une augmentation des charges particulières dans les eaux et à la sédimentation des particules fines sur le fond. La déforestation, les travaux d'aménagements et les mauvaises pratiques agricoles favorisent le ruissellement des eaux pluviales et donc l'érosion des sols. La conséquence est une baisse de lumière dans l'eau et donc une diminution de la profondeur à laquelle peuvent se développer les herbiers, une hypersédimentation sur les feuilles (diminuant la photosynthèse), et affaiblissant la croissance et la vitalité des plants. Les effluents urbains apportent, comme ceux agricoles, une surcharge de sels nutritifs qui



Fig. 5 : Herbiers et mouillages ne font pas bon ménage (Bretagne à gauche et Antilles à droite).

favorisent le développement du phytoplancton et des macroalgues opportunistes filamenteuses, limitant la vitalité des herbiers et amenant leur disparition dans de nombreux secteurs partout dans le monde. Par le même processus, les contaminants chimiques pesticides peuvent conduire à une perte des feuilles et une réduction de la photosynthèse chez les phanérogames marines dans les régions de culture intensive.

La récolte

Dans plusieurs régions du monde, les phanérogames marines ont de longue date été utilisées par les populations locales pour de nombreux types de services. Si ces exploitations sont aujourd'hui en nette régression, elles peuvent rester impactantes ponctuellement dans de nombreuses régions pauvres ou reculées dans le monde où subsiste une dépendance culturelle et économique vis-à-vis des herbiers.

PROTECTION ET RESTAURATION DES HERBIERS

Si une prise de conscience est amorcée (12), amenant de plus en plus d'herbiers marins à être considérés pour leur valeur patrimoniale, moins de 30% se situent dans des aires marines protégées. La préservation des herbiers marins dans les secteurs où tortues et siréniens sont présents est cependant devenue une priorité des actions de gestion et de conservation pour éviter un « surpâturage » et/ou une modification des couvertures végétales et de protéger, en préservant leurs ressources alimentaire, toute la biodiversité associée aux herbiers.

La restauration consiste à améliorer les conditions de croissance des phanérogames marines, par exemple en réduisant l'arrivée d'effluents néfastes dans leur milieu de vie, en les transplantant directement ou bien en ensemençant un lieu donné par des graines. Ce type d'action

restent cependant ponctuelles car difficiles à mettre en œuvre et coûteuses. Les essais de transplantation ont généralement un faible taux de réussite, demandent beaucoup de travail, puisqu'il faut que le lieu d'accueil soit adapté, et ont un coût élevé. Les résultats varient beaucoup selon les espèces : celles qui ont des forts taux de croissance vont avoir de bonne capacité de restauration au contraire des espèces à croissance lente. Il est donc évidemment préférable de préserver les herbiers existants que d'envisager de les restaurer une fois détruits.

LES ENJEUX ET LES ATOUTS DES HERBIERS EN PERSPECTIVE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les travaux les plus récents démontrent que selon différents processus écologiques les herbiers marins sont parmi les meilleurs écosystèmes comme éco-ingénieurs naturels pour lutter contre le changement climatique global. Pour peu qu'on leur laisse de l'espace disponible, les herbiers marins devraient être capables de s'adapter aux changements globaux dans de nombreuses situations : adaptation à l'élévation du niveau des océans en colonisant les nouveaux sédiments marins gagnés sur le littoral, et adaptation à l'augmentation des températures en colonisant des nouveaux espaces vers les pôles. Cette résistance est d'autant plus importante qu'ils possèdent naturellement un fort potentiel pour lutter contre les effets du changement climatique. D'une part ils sont un frein à l'érosion côtière car les rhizomes et racines stabilisent les sédiments tandis que la canopée des feuilles d'herbiers ralentit les courants, atténue l'impact des vagues, et augmente la sédimentation des particules en suspension. D'autre part les herbiers régulent la composition chimique de l'eau de mer en produisant de l'oxygène et assimilant le dioxyde de carbone durant le jour. Ils séquestrent durablement le carbone au sein des sédi-

ments (mais le libèreront s'ils sont détruits d'où le double enjeu de leur protection). Enfin les herbiers peuvent jouer un rôle tampon à l'acidification des océans car l'incorporation par la photosynthèse de carbone inorganique dissous augmente les valeurs du pH de l'eau de mer environnante, facilitant ainsi la calcification des invertébrés à coquille.

CONCLUSION

L'aménagement des territoires pour accueillir les populations humaines et le manque de prise de conscience par le public à propos des pertes que subissent les herbiers marins continuent à contribuer à leur déclin. Il est essentiel d'accroître la communication pour assurer une gestion conservatoire efficace de ces écosystèmes de première importance mais généralement mal perçus. Il faut étayer les connaissances et sensibiliser l'opinion publique et les décideurs sur l'importance des herbiers marins et les menaces auxquelles ils sont exposés, afin que des mesures soient instaurées pour leur protection, au même titre que les récifs coralliens, les mangroves en milieu tropical et les grands champs d'algues brunes en milieux tempérés.

RÉFÉRENCES

- (1) Green EP *et al.* (2003) *World Atlas of Seagrasses*, prepared by the UNEP World Conservation Monitoring Centre, University of California Press, 298 pp.
- (2) United Nations Environment Programme (2020) *Out of the blue: The value of seagrasses to the environment and to people*. UNEP, Nairobi
- (3) Hily C *et al.* (2003) Seagrasses of western Europe. In *World Atlas of Seagrasses*, UNEP World Conservation Monitoring Centre, University of California Press, Chapter 2 : 46-55.
- (4) Becheler R *et al.* (2010) The concept of population in clonal organisms: mosaics of temporally colonized patches are forming highly diverse meadows of *Zostera marina* in Brittany. 2010. *Molecular Ecology*, 19 : 2394-2407.
- (5) Hemminga M *et al.* (2000) *Seagrass ecology*. Cambridge University Press, Cambridge 298pp.
- (6) Boudouresque CF *et al.* (2006) Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. *Ramoge Pub* : 1-102. Isbn 2 905540 30 3.
- (7) Marbà N *et al.* (2002) Carbon and nutrient translocation between seagrass ramets. *Marine Ecology Progress Series* 226 : 287-300.
- (8) Hily C *et al.* (1999) Modifications of the specific diversity and feeding guilds in an intertidal sediment colonized by an eelgrass meadow (*Zostera marina*) (Brittany, France). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Serie III*, 322 : 1121-1131.
- (9) Nagelkerken I *et al.* (2000) Importance of mangroves, seagrass beds and the shallow coral reef as a nursery for important coral reef fishes, using a visual census technique. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 51 : 31-44.
- (10) Walker DI *et al.* (2006) *Decline and recovery of seagrass ecosystems : The dynamics of change*, *Seagrasses : biology, ecology, and conservation*, Springer, p 551-565.
- (11) Waycott M *et al.* (2009) Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *PNAS* 106 : 12377-12381.
- (12) Short FT *et al.* (2000) Global seagrass declines and effects of climate change. *Seas at the Millennium : an environmental evaluation*, 3 : 10-11.

Le microbiote symbiotique, clé de la santé végétale



Marc-André Selosse, professeur au Muséum national d'histoire naturelle (Paris), dirige l'équipe « Interactions et évolution végétale et fongique », au sein de l'Institut de systématique, évolution, biodiversité (unité CNRS, UMR 7205). Il a été jusqu'en 2013 professeur à l'université de Montpellier et a effectué ses recherches au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive. Ses recherches portent sur l'écologie et l'évolution des associations symbiotiques, en particulier les symbioses mycorhiziennes. Il est aussi professeur aux universités de Gdansk (Pologne) et Kunming (Chine), membre de l'Académie d'agriculture de France, président de la Fédération BioGée (<http://www.biogee.org/>) et éditeur de quatre revues scientifiques. Il contribue à la diffusion de l'information



scientifique auprès du grand public à travers les médias et conférences, et par plusieurs ouvrages sur les symbioses (2000), les microbiotes (2017) et les tannins (2019).

Vivienne Gianinazzi-Pearson, directrice de recherche CNRS, éditrice de l'A3 Magazine. Sa carrière scientifique est présentée à la page 3.

Résumé : C'est une erreur de considérer les plantes comme des organismes isolés : leur physiologie et leur niche écologique sont le produit d'interactions avec d'autres organismes. Comme nous et les animaux, elles dépendent intimement de microbes (microorganismes) pour une vie saine et un développement harmonieux. Toujours pris dans un réseau d'interactions microbiennes, les plantes ne sont donc... jamais seules. C'est ce qui est essentiel de prendre en compte pour améliorer la compréhension, la conservation et l'utilisation des ressources végétales.

LE MICROBIOTE VÉGÉTAL

Les plantes supérieures étant des organismes sessiles, elles doivent faire face *in situ* aux contraintes de la nature tels que des stress nutritifs, des bioagresseurs, les changements climatiques, la sécheresse etc. Elles ne peuvent le faire qu'en interaction concertée avec d'autres organismes : le phénotype d'une plante ne résulte pas seulement de son génotype, mais aussi d'une myriade de microorganismes qu'elle recrute dans le milieu ou dont elle hérite de ses parents. L'adaptation des plantes aux fluctuations de l'environnement est assurée grâce à ce réseau omniprésent de compagnons microbiens - le microbiote¹ végétal ou phytobiote - qu'elles hébergent et avec lequel elles forment un supraorganisme ou holobionte.

Le microbiote végétal consiste à la fois en une partie innée et une partie acquise. En effet, les cellules de la plante abritent des organites d'origine bactérienne,

porteurs de gènes et capables de division (1). C'est le cas des chloroplastes (lieu de la photosynthèse) et des mitochondries (lieu de la respiration et de la production d'énergie) qui résultent toujours de la division d'une mitochondrie ou d'un chloroplaste préexistant. Ces deux organites sont entourés de deux membranes qui peuvent être vues comme, respectivement, une membrane propre de la bactérie et une membrane de phagocytose, mise en place lorsque la cellule hôte ancestrale a « ingéré » ces bactéries. Enfin, l'analyse des gènes codés par ces organites a permis de retrouver des parentés avec des bactéries libres, bien que modifiés par une longue vie intracellulaire : les chloroplastes sont en fait des Cyanobactéries, alors que les mitochondries sont des Alpha-protéobactéries (2). Étonnamment, ce microbiote végétal inné est systématiquement ignoré : quand on parle d'une plante, on méconnaît qu'il s'agit d'un consortium symbiotique entre une cellule hôte et deux bactéries, incapables de vivre les unes sans les autres. Ainsi, certains herbicides agissant sur les chloroplastes ne sont en fait que des bactéricides affectant les bactéries photosynthétiques !

Le microbiote acquis d'une plante est composé de bactéries ou de champignons, pour la plupart des symbiotes, qui colonisent les parties aérienne et racinaire et qui jouent un rôle essentiel au bon développement et à la santé de leur hôte. La composition de ce microbiote est complexe. Il prend son origine dans les populations microbiennes du sol et peut varier d'un environnement à l'autre ou entre espèces végétales. Grâce aux réseaux

moléculaires et aux gènes spécifiques, la plante-hôte reconnaît les microorganismes bénéfiques et met en place des systèmes sophistiqués d'accueil (3). Tandis que cette face cachée de la biologie des plantes reste encore mal connue en ce qui concerne le microbiote de la phyllosphère (feuilles, fleurs, fruits, tiges), les recherches sur le microbiote symbiotique des racines ont fait l'objet d'un important développement depuis le milieu du XX^e siècle.

ACQUISITION D'UN MICROBIOTE SYMBIOTIQUE POUR LA COLONISATION DU MILIEU TERRESTRE

Les plantes proprement dites, c'est-à-dire les eucaryotes verts terrestres (ou Embryophytes), sont apparues il y a environ 470 millions d'années à partir d'ancêtres aquatiques encore inconnus. Leur sortie des eaux reste mal comprise : en effet, une algue recueille toutes ses ressources (eau, gaz, sels minéraux et lumière) dans l'eau, alors que les plantes terrestres utilisent une niche écologique compartimentée (eau et sels minéraux dans le sol, *versus* gaz et lumière dans l'air). La question est d'autant plus délicate que les plus anciens fossiles sont dépourvus de racines...

Il est fort probable qu'une association symbiotique avec un microbiote fongique a joué un rôle dans la première colonisation du milieu terrestre par les ancêtres aquatiques des plantes (4). Actuellement, les racines d'au moins 80% des 400 000 espèces végétales terrestres s'associent à un groupe de champignons symbiotiques (taxon Gloméromycètes) pour former un organe mixte, la mycorhize (du grec *myco*, « champignon » et *rhiza*, « racine ») (5). Cette association universelle joue un rôle central dans la nutrition minérale de la plante-hôte (voir ci-dessous), et plusieurs indices suggèrent qu'elle existait déjà chez l'ancêtre commun des plantes. D'une part, l'apparition des Gloméromycètes, datée par les

méthodes d'horloge moléculaire, est contemporaine de la sortie des eaux des plantes. D'autre part, les plus anciens fossiles se prêtant à des analyses de tissus (dans la flore de Rhynie, 400 millions d'années, bien avant les dinosaures) montrent déjà, dans les rhizomes d'*Aglaophyton* ou *Rhynia*, une colonisation par des Gloméromycètes (6).

On donne le nom de mycorhizes à arbuscules aux formes actuelles de la symbiose ancestrale avec les Gloméromycètes et maintenant située dans la racine, organe apparu entre-temps. Ce nom vient du fait que les champignons impliqués se ramifient dans les cellules racinaires pour former des structures arborescentes appelées arbuscules (Fig. 1A) par lesquelles ils obtiennent des sucres issus de la photosynthèse. En même temps que les champignons prolifèrent dans les racines, ils développent dans le sol un vaste réseau de filaments (hyphes) (Fig. 1B) interconnectés entre différentes plantes. La mycorhize peut ainsi explorer un volume du sol jusqu'à 1000 fois supérieur à celui exploré par les racines seules, transportant à travers les hyphes de l'eau et des sels minéraux vers les tissus racinaires (7). Cette activité biofertilisante est vitale à la productivité d'une grande majorité de plantes dans les écosystèmes naturels, ou anthropisés, et la survie de beaucoup d'espèces végétales est impossible sans leur microbiote symbiotique mycorhizien (8) (Fig. 1C).

LA DIVERSIFICATION DU MICROBIOTE SYMBIOTIQUE DANS LE RÈGNE VÉGÉTAL

Au cours de l'évolution terrestre des plantes, l'association mycorhizienne s'est diversifiée et des microbiotes fongiques différents ont permis la conquête de nouveaux milieux. C'est le cas de l'ectomycorhize où les champignons appartiennent aux Asco- ou Basidiomycètes (y compris des comestibles tels que la truffe ou le bolet) et

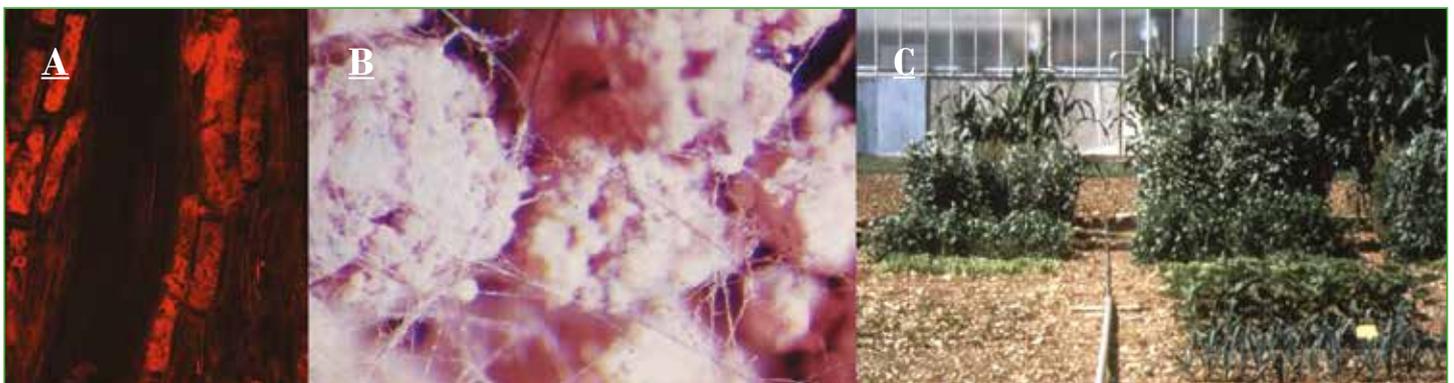


Fig. 1 : Mycorhizes à arbuscules : (A) arbuscules (colorés rouge) remplissant les cellules racinaires, (B) réseau d'hyphes ramifiant dans le sol, et (C) différentes plantes cultivées dans un sol sans (à gauche) ou avec (à droite) un microbiote mycorhizien © V. Gianinazzi-Pearson.

s'associent aux racines de plantes ligneuses, Angiospermes (Betulacées, Fagacées, Tiliacées, Cistacées, Dipterocarpacees, Fabacées, ...) ou Gymnospermes (Cupressacées ou Pinacées) (5). On considère que les ectomycorhizes datent du Crétacé (130 millions d'années, l'ère des dinosaures), mais la plupart des associations ectomycorhiziennes seraient apparues à la transition Eocène/Oligocène (56-34 millions d'années), caractérisée par un refroidissement mettant en place un climat tempéré. Même si plusieurs dizaines d'apparitions indépendantes ont eu lieu dans le temps chez les champignons et chez les plantes, les associations ectomycorhiziennes sont limitées presque exclusivement aux plantes ligneuses pérennes (environ 5% d'espèces végétales) qui dominent une grande partie des écosystèmes tempérés. Dans cette symbiose, les champignons prolifèrent entre les cellules et à la surface des racines latérales qu'ils couvrent d'un manchon mycélien (Fig. 2), à partir duquel émane un réseau mycélien souterrain qui peut atteindre 200m/g du sol et interconnecter des arbres d'âges et d'essences différents. Encore ici, le microbiote fongique obtient des sucres de la plante qu'il biofertilise en retour. Le réseau mycélien souterrain explore le sol pour le compte de l'arbre, améliorant/facilitant ainsi l'apport d'eau et de sels minéraux. La capacité de certains champignons ectomycorhiziens à exploiter de l'azote et du phosphate organique (ce dont sont incapables les Gloméromycètes) les rend plus utiles sur les sols forestiers pauvres et acides, où la minéralisation est lente.

Les Éricacées et les Orchidées, apparues respectivement au début et à la fin du Crétacé, forment un autre type de symbiose mycorhizienne, appelée mycorhize à pelotons à cause de la morphologie du microbiote fongique (Asco- ou Basidiomycète) dans les cellules racinaires (Fig. 3). La mycorhize à pelotons des Éricacées est une adaptation à des sols encore plus acides et pauvres en

azote, où la minéralisation est encore plus lente. Elle permet d'exploiter l'azote et le phosphate de la matière organique dans des landes infertiles de hautes latitudes ou d'altitudes où le froid ralentit la minéralisation dans le sol. Les Orchidées, et certaines Éricacées, ont accru leur dépendance à la symbiose : elles exploitent le microbiote fongique comme source de carbone ! Chez les premières, les graines, dépourvues de réserve, ne germent qu'après avoir été colonisées par le champignon qui apporte du carbone et toutes les ressources nécessaires à la graine. Beaucoup d'espèces d'Orchidées, vertes à l'âge adulte, passent à une association mycorhizienne classique, mais certaines (*Epipactis*, *Cephalanthera*), bien que photosynthétiques, continuent de recevoir du carbone fongique à l'âge adulte (on parle de mixotrophie). Bien plus, des espèces non-chlorophylliennes sont même apparues dans ces groupes mixotrophes : certaines Orchidées (comme la Néottie nid-d'oiseau) et des Éricacées (les Monotropes) se nourrissent exclusivement de carbone fongique que leurs champignons mycorhiziens obtiennent d'autres plantes, autotrophes celles-là, et qu'ils mycorhizent également (9). On entrevoit ici que ces symbioses, en créant des liens entre plantes, ouvrent aussi la voie à des interactions entre plantes.

Les bactéries du sol font aussi partie du microbiote végétal. En effet, certaines plantes ont conclu de nouvelles alliances nutritives avec des bactéries fixatrices d'azote. Bien que certaines de ces bactéries se placent dans la phyllosphère (cyanobactéries des fougères du genre *Azolla* ou des *Gunnera*), ces symbioses sont le plus souvent racinaires. Elles sont très complexes et impliquent la différenciation de nouveaux organes, les nodosités, où se fait la fixation d'azote gazeux (Fig. 3). Les plantes formant des nodosités fixatrices d'azote appartiennent toutes au même clade des Rosidées mais

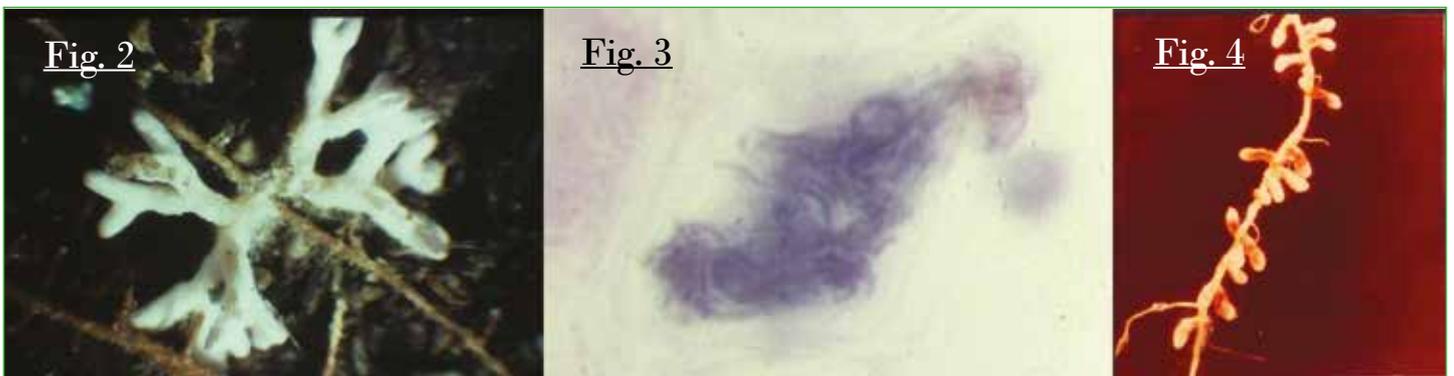


Fig. 2 : Racines ectomycorhizées couvertes d'un manchon mycélien blanc. Document INRAP, 1986. Fig. 3 : Peloton fongique (en bleu) dans une cellule racinaire de bruyère © V. Gianinazzi-Pearson. Fig. 4 : Nodosités sur une racine du pois © V. Gianinazzi-Pearson.

se divisent en deux grands groupes selon la bactérie et la plante-hôte : les Rhizobiums symbiotiques des Fabacées (Légumineuses, apparue il y a 80 millions d'années) et les Frankia chez plusieurs familles d'arbres comme l'aulne ou d'arbustes comme l'argousier (10). La fixation de l'azote exige de la plante beaucoup de carbone pour bâtir et nourrir les organes symbiotiques. Pour fabriquer 1 mg de matière sèche, une fabacée doit fixer 810 mg de carbone, contre 510 mg pour une espèce sans nodosité ! Ceci explique que cette symbiose ne soit pas universelle, bien qu'elle affranchisse la plante de trouver de l'azote soluble dans le sol. Un mécanisme ancestral et universel existe pour les symbioses racinaires, d'abord mis en place pour accueillir des champignons mycorhiziens à arbuscules, puis plus tard remobilisé pour héberger des bactéries fixatrices d'azote. On sait maintenant que les molécules de reconnaissance émises par le microbiote, la cascade signalétique induite chez la plante et les gènes impliqués dans leur reconnaissance par la plante sont en effet voisins, voire identiques (3, 5).

Malgré l'omniprésence des associations symbiotiques dans le règne végétal, quelques familles végétales se sont affranchies de la symbiose lors de l'évolution, telles que les Brassicacées et les Polygonacées. Cela ne veut pas pour autant dire qu'elles n'interagissent pas étroitement avec un microbiote au niveau de la rhizosphère. Les interactions sont diverses avec les microorganismes libres, bactériens ou fongiques, qu'ils fixent l'azote, mobilisent le phosphore, protègent la racine des pathogènes ou de substances toxiques... Les microorganismes rhizosphériques forment des interactions moins visibles morphologiquement mais déterminantes, aussi bien pour la santé des plantes mycorhizées que celles qui ne le sont pas.

LA PROTECTION DES PLANTES, SOUVENT UNE QUESTION DE MICROBIOTE

On sait aujourd'hui qu'une partie de la résistance des tissus végétaux aux maladies s'explique par la présence de microbiotes qui défendent les végétaux contre les stress biotiques ou abiotiques. Par exemple, les *Neotyphodium* qui sont des champignons endophytiques de la phyllosphère de nombreuses graminées, produisent divers substances (alcaloïdes) toxiques qui protègent la plante des herbivores, notamment les insectes (11). Cependant, ces champignons peuvent provoquer des troubles sanitaires chez les bovins qui consomment les graminées les hébergeant. Tel était le cas d'une graminée fourragère sélectionnée aux USA, Kentucky 31, qui privée expérimentalement de son endophyte toxique n'est plus très performante.

Heureusement, ce n'est pas le cas du microbiote fongique racinaire qui, en plus de son activité principale de biofertilisant, peut aussi se comporter en bioprotecteur contre les maladies causées par des champignons ou nématodes phytopathogènes, et aussi augmenter la tolérance des végétaux aux métaux lourds (phytoextraction, phytostabilisation), à la salinité ou à la sécheresse dans les écosystèmes extrêmes (8). Le phénomène de bioprotection serait expliqué par la barrière physique du manchon mycélien autour de la racine chez les ectomycorhizes. Chez les mycorhizes à arbuscules il serait plutôt lié à un renforcement des défenses naturelles de la plante-hôte, en partie grâce à l'augmentation de synthèse de composés antioxydants toxiques pour les organismes pathogènes mais bénéfiques à la santé humaine. De plus, certaines communautés bactériennes du sol, recrutées par le réseau mycélien ou colonisant la surface des racines, ajoutent à l'effet bénéfique du microbiote symbiotique par leurs capacités à immobiliser/mobiliser les métaux lourds dans le sol et à améliorer la résistance aux pathogènes.

LE MICROBIOTE VÉGÉTAL EN SOUCI

L'acquisition, la composition et le fonctionnement dynamique du microbiote végétal, régulés à la fois par les plantes et leur environnement, reposent sur un dialogue entre les partenaires qui a fait preuve de résilience au travers des âges et des fluctuations de l'environnement. Mais son fonctionnement est mis en péril par les activités anthropiques (8). L'utilisation des substrats artificiels et la désinfection des sols en horticulture l'excluent et, par conséquent, la nutrition des plantes et leur protection des racines contre les pathogènes exigent l'utilisation importante d'intrants chimiques. Dans les systèmes d'agriculture industrielle, l'apport excessif de fertilisants et de pesticides, mais aussi le labour profond des sols, diminuent l'efficacité du microbiote symbiotique. D'où la nécessité de le respecter, en évitant les pratiques néfastes, ou de le renforcer en cas de déficit en introduisant des microorganismes d'intérêt, si possible locaux, par une inoculation contrôlée, au moment du semis ou de la plantation. En effet, le microbiote symbiotique représente un important outil d'ingénierie écologique pour assurer une production végétale saine et limitant le recours à l'utilisation massive d'intrants chimiques (engrais, pesticides). L'acquisition d'inoculum de champignons ou de bactéries symbiotiques n'est pas un obstacle en soi car il existe des producteurs à travers le monde. La difficulté est d'assurer la qualité des produits (efficacité, traçabilité de la source), leur compatibilité avec la plante et le sol cibles, et leur stabilité dans les conditions de gestion culturale.

En conclusion, une plante dans la nature n'est jamais seule. Sa physiologie et sa niche écologique sont le produit de multiples interactions avec les acteurs du microbiote qui assurent une vie végétale saine dans les écosystèmes naturels. En revanche, l'agriculture ne va pas sans problèmes sanitaires, qu'ils soient dus aux maladies, à la pollution des sols ou aux modifications climatiques. La prise en compte du fonctionnement du microbiote végétal, forgé par des centaines de millions d'années de coévolution, est une pièce maîtresse pour améliorer l'utilisation des ressources végétales et développer des nouvelles stratégies de gestion ou de lutte contre la maladie.

RÉFÉRENCES

- (1) Margulis L (1970). *Origin of eukaryotic cells*. Yale University Press, Yale.
- (2) Selosse M-A, Loiseaux-de Goer S. (1997). La saga de l'endosymbiose: les plastes et les mitochondries, témoins et acteurs de l'évolution. *La Recherche* 296 : 36-41.
- (3) Gianinazzi-Pearson V, Dénarié J (1997). Red carpet genetic programmes for root symbioses. *Trends in Plant Science* 2: 371-372.
- (4) Selosse M-A, Le Tacon F. (2001). Les stratégies symbiotiques de conquête du milieu terrestre. *L'Année Biologique* 40 : 3-20.
- (5) Smith SE, Read DJ (2008). *Mycorrhizal symbiosis*, 3rd edn. Academic Press, San Diego.
- (6) Boullard B Lemoigne Y. (1971). Les champignons endophytes du "*Rhynia gwynne-vaughanii*" K. et L. Étude morphologique et déductions sur leur biologie. *Botaniste* 54 : 49-89.
- (7) Selosse M-A (2008). Les champignons qui nourrissent les plantes : les associations mycorhiziennes, in F. Halle (ed.), *Aux origines des plantes*, p. 266-281. Fayard, Paris.
- (8) Gianinazzi S, Gollotte A, Binet M-N, van Tuinen D, Redecker D, Wipf D. (2010). Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza* 20 : 519-530.
- (9) Selosse M-A., Roy M (2012). Les plantes qui mangent des champignons... *Dossier Pour la Science* « Les végétaux insolites » 77 : 102-107
- (10) Dommergues Y Duhoux E, Diem H.G. (1999). *Les arbres fixateurs d'azote*. Co-édition CIRAD/FAO/IRD, Paris.
- (11) Selosse M-A, Gilbert A (2011). Des champignons qui dopent les plantes. *La Recherche* 457 : 72-75.

NOTE

¹*Microbiote ou microbiome ? Le terme microbiote désigne l'ensemble des espèces microbiennes présentes dans un environnement (autrefois appelé microflore), et microbiome réfère soit à la niche écologique, soit à l'ensemble des gènes ou génomes présents dans le microbiote.*

L'immunité végétale, une fonction incontournable pour l'agriculture



Silvio Gianinazzi, docteur ès sciences de l'université de Genève et directeur de recherche émérite du CNRS, s'intéresse aux relations plantes-microorganismes, sous ses multiples aspects allant des interactions plantes-microorganismes pathogènes aux relations mutuellement avantageuses (symbioses). Co-fondateur et président de 3 réseaux COST-EU sur les mycorhizes, il a été l'auteur de très nombreux articles scientifiques dans des revues internationales et ouvrages. Il a été privat-docent et chargé de cours de microbiologie des sols à l'université de Genève et professeur invité au Scottish agricultural College. Soucieux de trouver des débouchés pratiques à ses recherches, il a développé des procédés de production et de management des microbiotes symbiotiques pour le développement d'une agriculture durable. Il a été fondateur et ex-président de la société Inoculumplus, basée à la technopole Agronov de Dijon, et il a fondé une société de conseil en biotechnologie microbienne (www.sacca-eu.com).

Résumé : *Les plantes ne produisent pas des anticorps comme les animaux, mais elles savent se défendre vis-à-vis des agents infectieux. Cette réponse de défense, appelée immunité végétale, prend des formes variées selon la plante, l'agent pathogène et l'environnement où elle s'exprime. La domestication des plantes a conduit à marginaliser ces formes naturelles de la défense au profit du rendement et a rendu inévitable l'utilisation de pesticides et d'engrais. Mais la demande incessante de notre société d'une production suffisante et pour une consommation de qualité a conduit la recherche à approfondir nos connaissances à la fois des facteurs génétiques et environnementaux impliqués, et des mécanismes régulant le fonctionnement de l'immunité végétale. Le but ultime est la mise en place d'une protection des cultures basée sur les principes de l'agroécologie, mobilisant les régulations naturelles et la capacité des plantes à se défendre elles-mêmes, et de passer ainsi de l'âge du chimique à l'âge du biologique.*

Les plantes, comme tous les organismes vivants, sont soumises à des attaques multiples par de nombreux organismes pathogènes : virus, bactéries, champignons, insectes, nématodes... et leur développement et survie sont liés à leur capacité de se défendre. La locution « immunité végétale » désigne l'ensemble des fonctions naturelles qui permettent aux plantes de résister aux agents infectieux. Avec la montée en épingle de la question de l'utilisation des produits phytosanitaires dans nos productions agricoles, question portée par la société civile (par exemple le combat pour l'interdiction du Gaucho « tueur d'abeilles » ou de l'herbicide glyphosate), la compréhension de ce phénomène s'impose (et s'est imposé depuis des décennies) aux chercheurs car sa maîtrise est essentielle à une réduction drastique, voir à l'abandon, des pesticides de synthèse en agriculture.

Plusieurs organismes en France - INRAE, CNRS, universités, IRD, Cirad... - consacrent des programmes importants de recherche à cette thématique. Un ouvrage récent, et duquel je me suis largement inspiré, réalise une synthèse des connaissances actuelles et jette les bases de leur prise en compte pour développer une protection efficace, durable et respectueuse de la santé et de l'environnement (1).

QU'ENTENDONS-NOUS PAR « IMMUNITÉ VÉGÉTALE » ?

Historiquement on limitait le qualificatif d'immune à une plante manifestant une résistance absolue vis-à-vis d'un pathogène, mais aujourd'hui un nouveau concept a émergé qui définit l'immunité végétale comme toute forme de résistance des plantes vis-à-vis d'agents infectieux. Suite à l'infection d'une plante par un pathogène, toute une gradation de symptômes sont susceptibles d'apparaître allant de l'absence totale de symptômes (immunité) jusqu'à des symptômes modérés (résistance) ou graves (sensibilité) ; la tolérance est considérée comme un cas particulier de sensibilité, sans ou avec très peu de symptômes (voir aujourd'hui les porteurs asymptomatiques du coronavirus SARS-CoV-2). Depuis le milieu du XX^e siècle, nous savons aussi qu'une plante ayant résisté à une première infection dans un tissu donné, développe une résistance accrue aux attaques suivantes dans le restant de ses tissus : on parle alors d'une résistance ou immunité acquise ou systémique (2). Parmi les différentes formes de résistance, la réaction d'hypersensibilité (Fig. 1) a probablement été la plus étudiée : elle se caractérise par la formation d'une nécrose au point de pénétration du pathogène, qui se voit de ce fait confiné. Elle est généralement contrôlée par un gène de résistance (R) dominant de la plante. On



Fig. 1 : Réaction d'hypersensibilité au Virus de la Mosaïque du Tabac dans une feuille de tabac. À gauche des nécroses sont formées au lieu de la pénétration du virus dans les tissus foliaires, ce qui bloque sa progression dans les autres tissus de la plante qui restent saines (à droite). ©Silvio Gianinazzi.

sait aujourd'hui que cette résistance, dite qualitative, n'est sans doute qu'une petite partie de l'immunité végétale, et non l'essentiel comme on l'avait pensé autrefois. En effet, il existe de façon prépondérante dans les populations végétales, une résistance dite quantitative ou partielle des plantes, impliquant plusieurs gènes et qui conduit à une réduction de la maladie plutôt qu'à sa disparition. Nous savons aussi aujourd'hui que l'expression de la résistance des plantes est le résultat d'une interaction entre des facteurs génétiques de la plante, des facteurs génétiques de l'agent pathogène et des facteurs environnementaux. En conséquent, le monde de la phytopathologie évolue vers une vision systémique de l'immunité végétale allant de la cellule à la plante entière, voire à la population ou au paysage. Et cela d'autant plus que la plante infectée a la possibilité de prévenir les plantes alentour de l'attaque d'agresseurs : par exemple, par l'envoi de signaux via les réseaux de microorganismes symbiotiques interconnectant les racines de différentes plantes (3).

LES MÉCANISMES DE L'IMMUNITÉ CHEZ LES PLANTES

Les plantes n'ont pas, contrairement aux mammifères, des cellules immunitaires spécialisées. Comme le disait le chercheur hongrois G.L. Farkas, l'initiale coexistence pacifique de l'hôte et du parasite conduit lorsque les

deux parties s'affrontent : soit à la destruction partielle ou totale de l'hôte, soit à l'élimination du parasite par des mécanismes de défense divers (4). Nous savons maintenant que cela est possible grâce à l'existence de mécanismes très sophistiqués qui permettent une reconnaissance réciproque plante/agent pathogène. Ces mécanismes sont basés sur des récepteurs moléculaires localisés au niveau de la membrane des cellules végétales, ou dans les cellules, et qui permettent à la plante de reconnaître respectivement des motifs moléculaires très conservés chez le pathogène ou bien des protéines injectées par celui-ci lors de sa pénétration dans la cellule végétale. L'alerte est ainsi donnée et les plantes, qui possèdent l'information génétique nécessaire à l'expression de la résistance, peuvent reprogrammer leur métabolisme pour activer les systèmes de défense permettant d'arrêter ou de limiter fortement la progression de l'agent pathogène. On estime que ce processus de reprogrammation génétique peut concerner environ 20-40% des gènes de la plante. Le résultat de ces modifications n'est pas la production d'anticorps, comme chez les animaux, mais la mise en place d'un environnement métabolique hostile au développement de l'agent pathogène dans les tissus de la plante-hôte.

Les travaux sur les mécanismes de défense ont aussi conduit à la découverte des stimulateurs des défenses naturelles (SDN), qui permettent de simuler une attaque par un agent pathogène et ainsi d'enclencher chez la plante les mécanismes de défense. Parmi ceux-ci, citons l'acide acétylsalicylique (aspirine) capable d'induire une résistance aux virus, la laminarine (polymère de β -1,3-glucane extrait des parois de l'algue brune) qui protège la vigne contre l'infection par les champignons pathogènes *Plasmopara viticola* et *Botrytis cinereale*, ou le BTH (S-méthyle benzo (1,2,3) thiadiazole-7-carbothiate) qui a été le premier stimulateur de défense à avoir été commercialisé en Europe sous le nom de Bion©.

L'IMMUNITÉ AU COURS DE LA DOMESTICATION DES PLANTES

La domestication des plantes a conduit à privilégier des caractères agronomiques, tels que le rendement ou la qualité organoleptique des produits, au détriment de la résistance aux agents pathogènes. Nous savons aussi que cette domestication entraîne de nombreux changements génétiques et phénotypiques chez les plantes, notamment au niveau de l'architecture des racines. De plus, les pratiques culturales courantes en agriculture qui l'accompagnent modifient les propriétés physico-chimiques des sols. L'ensemble de ces changements ont des répercussions importantes sur le microbiome tellurique : les communautés microbiennes sont moins

diversifiées et leurs relations symbiotiques avec les plantes cultivées sont amoindries par rapport aux plantes sauvages. Or les plantes, organismes fixes dans un environnement fluctuant, ont appris au cours de l'évolution à gérer de manière favorable à leur développement les interactions avec les composantes abiotiques et biotiques, en particulier microbiennes. Ainsi en milieu naturel, les tissus des plantes et leur intime environnement aussi bien souterrain (rhizosphère) qu'aérien (phyllosphère) sont truffées de microorganismes bénéfiques à leur développement (cf. l'article de Selosse & Gianinazzi-Pearson page 31) et qui, pour certains, contribuent à l'expression de l'immunité chez les plantes. En concomitance, les peuplements de plantes sauvages possèdent une diversité génétique élevée. Le résultat est qu'en milieu naturel les plantes saines sont la règle et la maladie l'exception. Or, il en va autrement dans l'agriculture intensive actuellement pratiquée où l'équilibre en défaveur des agents pathogènes est rompu suite à l'utilisation de variétés génétiquement uniformes, avec des déterminants génétiques de protection rapidement contournable par les agents infectieux, et à une fertilisation non limitante. Dans ces conditions le recours à des pesticides reste incontournable pour éviter des baisses des rendements et la naissance d'épidémies.

La dernière famine en Europe, provoquée par le champignon *Phytophthora infestans* en Irlande en 1846-1848, illustre bien l'impact de l'utilisation d'un nombre réduit de variétés de pomme de terre avec une faible diversité génétique. Comme le fait remarquer Christian Lannou dans le livre cité en référence (1), *les fermiers irlandais avaient construit un système de culture qui s'apparentait par certaines de ses caractéristiques, notamment l'absence de diversité, aux systèmes intensifs actuels, mais avec un handicap majeur : ils n'avaient pas de pesticides.*

COMMENT GÉRER L'IMMUNITÉ AU CHAMP ?

Nous savons maintenant que l'extrême faiblesse de la diversité génétique dans les systèmes de production végétale est une des causes majeures de la sensibilité des plantes aux agents pathogènes, ce qui rend inévitable l'utilisation de pesticides. Or, comme le souligne Christian Lannou, dans sa vision pour le futur (1), pour bénéficier du potentiel de l'immunité végétale il est nécessaire de re-diversifier ce caractère dans les plantes cultivées et cela à toutes les échelles possibles : plante, champ, paysage. Ce qui plaide pour une mise en place d'une diversité génétique au sein des parcelles, des exploitations et des paysages. Cela implique une augmentation de la diversité génétique intrinsèque des

plantes cultivées, en intégrant à la fois des gènes de résistance qualitative et quantitative. Mais il implique aussi de recréer la diversité fonctionnelle au niveau de la parcelle cultivée, en associant des variétés différentes, et en intégrant les dimensions spatiale et temporelle du paysage cultivé dans la stratégie de gestion de l'immunité végétale. Par exemple, lors du choix de l'espèce à cultiver prendre en considération la présence (ou non) de plantes réservoirs de l'agent pathogène redouté, ou bien favoriser le développement des microbiotes protecteurs.

L'exemple des rizières du Yunnan en Chine est un très bon exemple de réussite de la mise en pratique de mélanges variétaux à grande échelle, faite pour contrôler la maladie fongique appelée la pyriculariose du riz et causée par le champignon *Magnaporthe grisea*. Ainsi, comme il est rapporté par Frédéric Fabre et collaborateurs (1), des mélanges associant des variétés de riz sensible et résistantes à la pyriculariose ont été déployés sur cinq cantons (812 hectares) en 1998, puis sur dix cantons (3342 hectares) l'année suivante. S'est ensuivi une diminution de la sévérité de la pyriculariose de 94% et d'une augmentation des rendements de 89% par rapport aux cultures pures d'une variété sensible à la maladie. Ces mélanges se sont ensuite généralisés à plus d'un million d'hectares à partir de 2004. En France, comme cité dans l'article de Remy Peronne et collaborateurs (1), l'usage de mélanges variétaux a fortement progressé en passant, dans le cas du blé tendre, d'environ 200 000 ha au début des années 2000 à plus de 550 000 ha en 2019, soit à plus de 11% de la surface totale cultivée. Il est intéressant de noter que, d'après une enquête réalisée dans le cadre du projet ANR Wheatamix, les deux principales motivations des agriculteurs pratiquant l'utilisation de mélanges variétaux sont de réduire l'utilisation d'intrants chimiques et de sécuriser le rendement.

Mais dans cette quête de diversification génétique des plantes et de leur environnement, il est nécessaire d'intégrer aussi le potentiel génétique représenté par le microbiome, notamment tellurique, qui peut constituer une composante importante de l'immunité des plantes. Par exemple, les champignons symbiotiques formant les mycorhizes et faisant partie de ce microbiome (cf. l'article de Selosse & Gianinazzi-Pearson page 31), peuvent induire une immunité vis-à-vis des pathogènes racinaires. C'est le cas de la tomate attaquée par *Phytophthora infestans*, champignon pathogène pour lequel nous ne disposons pas de fongicides : la colonisation des racines par le champignon mycorhizogène *Glomus intraradices* induit une résistance systémique et protège la plante contre ce pathogène (Fig. 2).



Fig. 2 : Systèmes racinaires de tomate qui ont développé dans un substrat infesté par le champignon pathogène *Phytophthora infestans*. À droite les racines colonisées par le champignon mycorhizogène *Glomus intraradices* ne présentent pas de symptômes de maladie contrairement à celles nécrosées de la plante non mycorhizées à gauche. ©Graziella Berta.

En parallèle de l'approche génétique, la progression de nos connaissances des mécanismes moléculaires de résistance des plantes devrait permettre d'affiner l'utilisation, non seulement des ressources génétiques, mais aussi celle des inducteurs naturels de résistance et plus largement des microorganismes symbiotiques.

L'IMMUNITÉ ET LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Bien que la plupart des facteurs environnementaux peuvent affecter les interactions plante-bioagresseur, les études des interactions complexes plante-bioagresseur-environnement restent peu nombreuses. Les facteurs les plus étudiés sont les effets de changement de température, de l'apport en eau, de la salinité des sols et des eaux d'irrigation et, loin derrière, de la teneur en gaz atmosphérique et de la lumière. Il y a déjà presque 100 ans, il a été montré chez le tabac que des températures supérieures à 30°C inhibent l'expression du gène dominant de résistance (N) au Virus de la Mosaïque du Tabac ; cela résulte en la suppression de la réaction hypersensible (RH) nécrotique, le développement d'une infection systémique de la plante et l'apparition des symptômes dites de mosaïque (5). Cependant, ce phénomène est réversible, c'est-à-dire que le retour de la plante infectée à des températures inférieures à 30°C permet le réenclenchement de la RH nécrotique généralisée à tous les tissus où le virus est en train de se multiplier, avec des

conséquences catastrophiques pour la plante (Fig. 3) (6). Ce phénomène questionne fortement l'opportunité d'une stratégie de sélection qualitative, basée sur un seul gène dominant de résistance, dans une situation d'avenir propice aux changements climatiques.

LE RÔLE DE LA SOCIÉTÉ CIVILE

La lutte contre les agents pathogènes, tout comme l'ensemble des pratiques agricoles, doit opérer une transition écologique. Comme évoqué dans la conclusion du livre cité en référence (1), *il s'agit de passer de l'âge du chimique à l'âge du biologique, de sortir de systèmes très artificialisés dans lesquels les plantes sont sous fertilisation surabondante et sous protection chimique préventive, pour valoriser les régulations biologiques naturelles, tirer parti des effets stimulants et protecteurs du microbiote, et exprimer pleinement le potentiel de l'immunité naturelle. Cette transition ne peut relever d'une simple logique de substitution.* Les stratégies de sélection doivent intégrer celles des pratiques culturales, permettant de ne plus impacter sur la perte de biodiversité et, notamment, sur la disparition des orga-



Fig. 3 : L'effet d'une hausse de température sur le développement du Virus de la Mosaïque du Tabac. Suite à une infection virale et formation de nécroses à 20°C, les plantes de tabac à gauche et au milieu ont été placées respectivement pendant 1 jour et 2 jours à 30°C. Dans ces conditions la réaction de résistance (hypersensibilité) est inhibée et le virus se répand dans la plante. Avec le retour ensuite des plantes à 20°C, la réaction de résistance est déclenchée de nouveau et tous les tissus contenant du virus nécrosent, contrairement au témoin (à droite). ©Silvio Gianinazzi.

nismes bénéfiques impliqués dans la fertilité du sol, la pollinisation, le contrôle de ravageurs, l'induction de

résistance etc... Ainsi, cette transition écologique nécessite, comme pour toute épidémie, de raisonner à différentes échelles : de la plante à la parcelle cultivée et au bassin de production.

L'exigence d'une production et d'une consommation durable, exprimée de plus en plus fortement par la société civile, constitue un stimulus de poids dans la conception et la mise en place d'une protection des cultures basée sur les principes de l'agroécologie, mobilisant les régulations naturelles et la capacité des plantes à se défendre elles-mêmes contre les agressions. Il s'agit là d'un défi dont la difficulté ne doit pas être sous-estimée, et qui impose de concilier des objectifs de production et des objectifs de régulation sanitaire.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Dominique Roby (Directeur de recherche CNRS, LIPM Toulouse) pour relecture et suggestions.

RÉFÉRENCES

- (1) Lannou C, Roby D, Ravigné V, Hannachi M et Moury B (2021) *L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies*. Edition QUAE, 392 pages.
- (2) Gilpatrick, J.D et Weintraub, M. (1952) An unusual type of protection with carnation mosaic virus. *Science* 115 : 701-702.
- (3) Song YY, Zeng R.S, Xu JF, Li J, Shen X, Yihdego WG (2010) Interplant communication f tomato plants through underground common mycorrhizal networks. *PLoS ONE* 5, e13324.
- (4) Gianinazzi, S (1970) Hypersensibilité au Virus de la Mosaïque du Tabac chez divers Nicotiana : effet thermique et protéines solubles. Thèse de Docteur-ès-sciences n°1547 université de Genève.
- (5) Samuel, G (1931). Some experiments on inoculating methods with plant viruses and local lesions. *Annals of Applied Biology* 18 : 494-507.
- (6) Kassanis, B (1956). Some effects of high temperature on the susceptibility of plant to infection with viruses. *Annals of Applied Biology* 39 : 358-369.

Réécriture génomique, outil d'obtention de résistance aux parasites et pathogènes des plantes cultivées



Georges Pelletier, agronome et généticien, a effectué sa carrière à l'Inra (1967-2008) où ses recherches ont porté sur la reproduction des plantes et la modification de leurs génomes cytoplasmiques (plastides et mitochondries) par des approches de fusion cellulaire, ou de leurs génomes nucléaires par transfert de gènes. Ses travaux ont connu des applications en sélection, en particulier chez les Brassicacées (crucifères). De 2002 à 2010 il a présidé le directoire de Genoplante, le programme français de génomique végétale qui a permis la réalisation de plus de 300 projets nationaux et en collaboration avec d'autres pays d'Europe. Laurier d'excellence de l'Inra en 2006, Georges Pelletier est membre de l'Académie des sciences et de l'Académie d'agriculture de France.

Résumé : D'innombrables parasites et pathogènes provoquent à l'échelle mondiale des pertes importantes de la production végétale agricole. Les échanges internationaux et les perspectives climatiques vont dans le sens d'une aggravation de cette pression parasitaire. Une voie efficace pour y répondre est d'exploiter la résistance génétique que les sélectionneurs développent depuis le siècle dernier. La méthode originale de réécriture (« editing » en anglais) ou modification ciblée du génome, dont les outils se perfectionnent sans cesse, stimule la recherche dans le domaine des interactions entre une plante hôte et ses pathogènes afin de créer des résistances par inactivation ou modification de gènes candidats. De nombreux résultats concrets ont déjà été obtenus mais, alors que ce domaine de recherche est en plein essor dans le monde, les freins à ses applications sont actuellement réglementaires et politiques en Europe.

La production agricole est soumise aux aléas, souvent liés, du climat et de la pression de parasites et de pathogènes attaquant les végétaux. Le passage de la polyculture ancestrale sur de petites parcelles à un paysage agricole avec un nombre limité d'espèces sur de grandes surfaces favorise l'exposition à une très large diversité d'ennemis et leur prolifération : virus, viroïdes, bactéries, champignons, oomycètes, nématodes, arthropodes, mollusques, plantes parasites... Une étude récente (1) portant sur les 5 principales productions, qui représentent près de 50% de l'apport calorique pour la population mondiale, situe ces pertes entre 20 et 30% en moyenne : 21,5% pour le blé, 30% pour le riz, 22,6% pour le maïs, 17,2% pour la pomme de terre, et 21,4% pour le soja. Les pertes de production agricole sont très variables selon les régions du monde, la latitude et les méthodes de contrôle qui sont appliquées, les parasites

et pathogènes affectant plus les productions végétales des régions les moins favorisées du point de vue socio-économique. L'émergence de « nouveaux » pathogènes comme certaines races de rouille du blé ou la prolifération de plantes parasites comme la Striga du maïs sont aussi une cause majeure de ces pertes.

LES RÉSISTANCES GÉNÉTIQUES POUR RÉDUIRE L'IMPACT DES ENNEMIS DES CULTURES

Lors de l'attaque d'un agent pathogène, la plante dispose d'un système de défense qui fait appel à des mécanismes cellulaires qui détectent le pathogène à la surface et à l'intérieur de la cellule. Ces mécanismes sont basés sur des récepteurs moléculaires qui reconnaissent des motifs moléculaires propres à ces pathogènes, ou induits par ces derniers au niveau des cellules hôtes. Cette reconnaissance déclenche l'activation des réactions immunitaires de la plante qui interrompent la croissance ou la multiplication des pathogènes (cf. l'article de S. Gianinazzi page 36). Les gènes impliqués sont donc des « gènes de résistance » (R) génétiquement dominants mais qui, reposant sur des reconnaissances moléculaires très spécifiques, sont parfois contournés. Ainsi certaines races ou variantes du pathogène peuvent, dans une course aux armements entre l'hôte et son pathogène, produire de nouveaux motifs moléculaires qui échapperont à cette reconnaissance et aux réactions d'immunité de la plante.

Les méthodes traditionnelles de sélection utilisent largement ces gènes de résistance

La recherche de ces gènes végétaux de résistance aux pathogènes, réalisée le plus souvent dans des espèces

sauvages apparentées aux plantes cultivées, et leur exploitation pour l'amélioration des variétés a été, et demeure, une des activités principales des sélectionneurs. Par exemple, les croisements de la tomate cultivée, *Solanum lycopersicum*, avec des espèces sauvages voisines (*S. hirsutum*, *S. peruvianum*, *S. chilense*, *S. pimpinellifolium*, etc ...) ont été largement utilisés pour conférer à la première des résistances vis-à-vis des parasites tels que bactéries, virus, champignons. En 1943, le croisement d'un pommier cultivé, *Malus domestica*, avec *Malus floribonda*, espèce sauvage résistante à la tavelure, a été réalisé aux Etats-Unis. Partant du matériel végétal obtenu, plus résistant à cette maladie fongique, les chercheurs de l'Inra produiront dans les années 1970 la variété « Ariane », commercialisée en 2005 et nécessitant moins de traitements antifongiques.

De larges séquences d'ADN, associées aux gènes de résistance de ces espèces sauvages et acquises lors des croisements, persistent dans le génome des variétés modernes des plantes cultivées. Le transfert de gènes de résistance peut même être réalisé quand le croisement entre des espèces différentes n'est pas possible. Ainsi, le croisement entre *Aegilops ventricosa* (égilope ventru), résistant au piétin-verse, et *Triticum durum* (le blé dur) (2) a donné un hybride qui, suite au doublement de ses chromosomes par un traitement à la colchicine, a pu être croisé avec le blé tendre *T. aestivum*. La résistance au piétin-verse d'*A. ventricosa* a pu ainsi être transférée au blé tendre, ce qui a permis aux équipes de l'Inra de créer la variété « Renan », cultivée depuis 1989 dans les systèmes de cultures à faibles intrants. Par ailleurs, le gène de résistance à la maladie fusariose de l'épi présent chez *Thinopyron elongatum*, herbe pérenne d'Eurasie, provient d'une transmission spontanée au génome de cette plante d'un gène d'un champignon endophyte des graminées (*Epichloë*). Ce « transgène » a été ensuite transféré au blé tendre par croisement interspécifique avec *T. elongatum*.

Ces méthodes requièrent de nombreuses années car le croisement initial avec les espèces sauvages apporte des caractéristiques indésirables que la domestication et la sélection avaient éliminées chez les espèces cultivées. Des croisements successifs d'amélioration sont nécessaires pour s'en débarrasser partiellement.

Les gènes de sensibilité pour une meilleure durabilité des résistances

Plantes hôtes et pathogènes entretiennent de nombreuses interactions au niveau moléculaire. Pendant l'infection, les pathogènes sécrètent un arsenal de molécules appelées effecteurs et produites par de très nom-

breux gènes, qui comprennent des protéines enzymatiques dégradant les parois végétales (permettant leur approvisionnement en sources carbonées et azotées) ou des toxines qui altèrent les fonctions vitales de la plante. Ces effecteurs ciblent des gènes végétaux et les inactivent par mutation, ce qui va altérer la capacité du pathogène à provoquer la maladie. Il en est de même pour des gènes codant des protéines impliquées dans le développement de la plante hôte et dont le pathogène a besoin pour se développer. Ces gènes, dits de sensibilité (gènes S), une fois inactivés par mutation, réduiront la capacité du pathogène à provoquer la maladie et entraîneront donc une certaine résistance. Une condition pour l'utilisation pratique de telles mutations pour obtenir des plantes résistantes est que la plante ait la possibilité de s'adapter à leur absence.

Les résistances obtenues à partir de pertes de fonctions de ces gènes végétaux S, induites par mutations, se présentent comme des alternatives qui ont un plus grand potentiel de durabilité que les résistances portées par les gènes R, car leur contournement par le pathogène suppose que ce dernier « réinvente » la fonction de la plante qui lui fait défaut. L'exemple typique d'un gène végétal de sensibilité à une maladie fongique est celle du gène appelé Mlo qui code une protéine transmembranaire nécessaire à la pénétration de l'agent pathogène de l'oïdium à travers la paroi végétale. Dans le monde, environ 10 000 espèces végétales sont contaminées par plus de 650 espèces de ce champignon. Des résistances vis-à-vis de l'oïdium ont d'abord été découvertes chez l'orge où elles sont conférées par des mutations de perte de fonction du gène Mlo (3). De nombreuses variétés d'orge possédant cette résistance sont cultivées depuis près de 50 ans, sans contournement, et qui est effective quelle que soit la souche de champignon. Depuis des résistances spontanées du même type ont été découvertes chez des espèces aussi différentes que le melon, le pois, la tomate, le concombre, le tabac. Cependant, elles ont en général un coût physiologique pour la plante mais qui peut être ensuite atténué par sélection.

LA RÉÉCRITURE (OU « ÉDITION ») GÉNOMIQUE AU SERVICE DES PLANTES CULTIVÉES

Des méthodes de modification ciblée des génomes se sont développées ces dernières années pour apporter des modifications de la séquence d'ADN en un site choisi du génome. Elles reposent sur l'utilisation d'enzymes, les endonucléases, qui coupent l'ADN nucléaire à des endroits précis ; les plus utilisées s'appellent TALEN (*Transcription activator-like effector nucleases*) et CRISPR (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic*

Repeats). Dans la méthode TALEN, le site de coupure est reconnu par les domaines de liaison à l'ADN de protéines chimériques comportant également une activité nucléase. Le système CRISPR/Cas9, dont l'invention a été reconnu par un Prix Nobel à E. Carpentier et J. Doudna en 2020, est d'origine bactérienne pour lutter contre les virus à ADN chez des bactéries (bactériophages). Dans la méthode CRISPR Cas (4), la nucléase Cas (Cas9 ou d'autres depuis) est associée à un ARN « guide » qui la positionne par complémentarité à l'un des deux brins d'ADN, et réalise ainsi une coupure à un site déterminé de l'ADN du gène cible.

Utilisant l'une ou l'autre de ces deux méthodes, dites de ciseaux moléculaires, une séquence donnée dans le génome subit une coupure franche des deux brins d'ADN, ce qui permet par la suite trois types d'interventions sur ce génome (Fig. 1). Dans le type d'intervention dit SDN1 (pour *Site Directed Nuclease*), tout comme des coupures d'ADN qui se produisent régulièrement dans la vie de la cellule, celle-ci répare immédiatement la coupure, quelquefois avec une erreur par perte ou insertion de nucléotides, comme lors d'une mutation

spontanée. SDN1 dans un gène conduira alors à l'inactivation de ce gène. Alternativement, la réparation de la coupure de l'ADN peut être réalisée en présence d'une matrice d'ADN fournie à la cellule et homologue de la région coupée, mais différente par une ou plusieurs nucléotides. Ce type d'intervention, dit SDN2, s'apparente au remplacement d'un allèle (variant) par un autre par croisement et sélection. Dans le troisième type d'intervention, dit SDN3 ou transgénèse ciblée, la réparation de la coupure de l'ADN est réalisée en fournissant une matrice d'ADN homologue à ses bordures et contenant un transgène (gène étranger ou non à l'espèce et apportant un nouveau caractère), qui va s'insérer par recombinaison homologue au site de coupure.

D'autres méthodes de réécriture dérivées des propriétés du système CRISPR ont été développées pour réaliser des modifications de plus en plus précises, en ciblant individuellement les bases nucléiques qui constituent des brins de l'ADN. Des protéines hybrides entre la nucléase Cas9, dont on a inactivé la fonction nucléase, et une cytidine désaminase ou une adénosine désaminase permettent respectivement de transformer chimique-

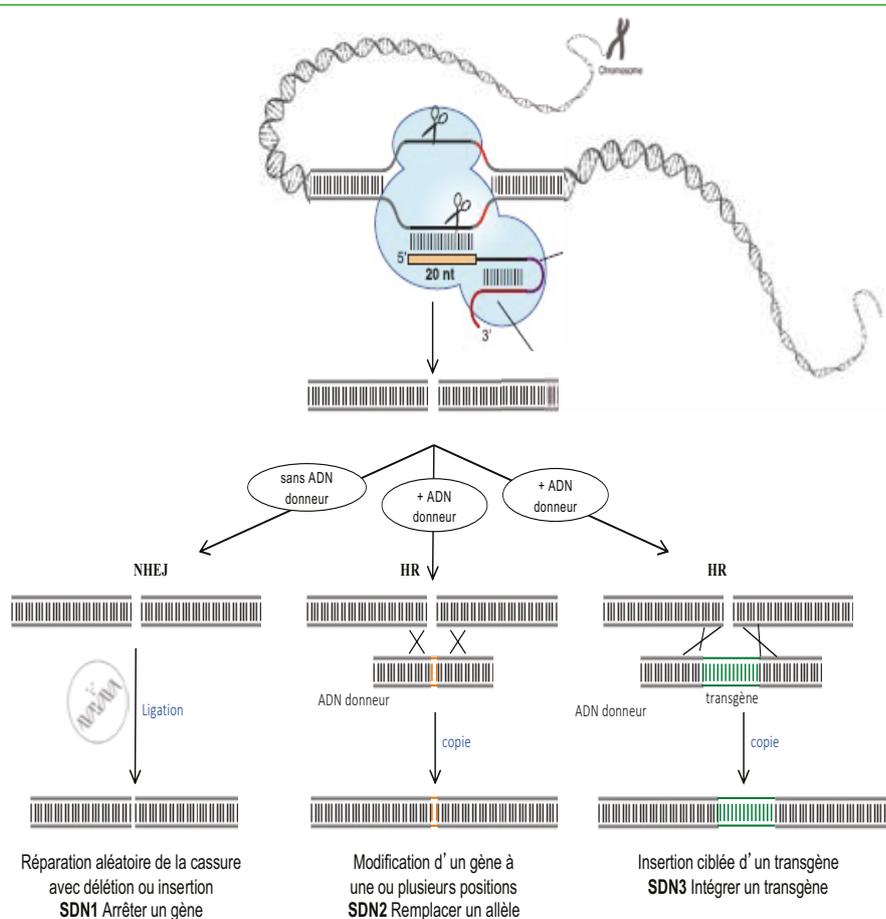


Fig. 1 : Ciseaux moléculaires (CRISPR Cas9) qui réalisent la coupure des deux brins de la molécule d'ADN dans un site déterminé, et trois types d'interventions d'édition génomique ciblées sur un seul site d'un génome (SDN1, SDN2, SDN3) (voir texte).

ment une base cytidine (C) en uridine (U), ou une base adénine (A) en guanine (G), apportant un degré de précision jamais atteint auparavant dans l'édition génomique. De plus, l'association d'une reverse transcriptase à Cas9 inactivée et la prolongation de l'ARN guide par une séquence destinée à être convertie en ADN permet la réécriture directe d'une plus longue séquence du génome (*prime editing* en anglais) (5).

LA RÉÉCRITURE GÉNOMIQUE ET LA RÉSISTANCE AUX MALADIES

L'inactivation d'un gène (voir Fig.1, SDN1) est l'opération de réécriture génomique la plus facile à réaliser. Ici, quelques exemples de son application sont donnés avec les avantages et désavantages (6). L'inactivation du gène *SlJAZ2* de la tomate induit une résistance à la bactérie pathogène *Pseudomonas syringae*, agent de la mouche bactérienne, tandis que celle d'un autre gène, *Dmr6*, résulte en une résistance à la même bactérie et à d'autres du genre *Xanthomonas*, ainsi qu'à l'oomycète *Phytophthora capsici* causant la pourriture du collet et des fruits. Chez le riz, le gène *OsCYP71A1* est responsable de la synthèse de sérotonine induite par l'attaque de certains insectes dont l'activité herbivore en dépend. L'inactivation de ce gène bloque la synthèse de sérotonine et rend alors le riz résistant aux attaques de la cicadelle brune et de la pyrale rayée du riz, insectes particulièrement dévastateurs en Asie. Cette résistance aux insectes herbivores du riz s'accompagne, par ailleurs, d'une meilleure résistance à la pyriculariose *Magnaporthe grisea* mais une plus grande sensibilité à l'helminthosporiose, *Bipolaris oryzae*. Les résistances obtenues par l'inactivation complète d'un gène peuvent

l'inactivation des trois paires de gènes *Mlo* du blé (qui possède trois génomes A, B, D), par la méthode de réécriture génomique TALEN, rend le blé tendre résistant à l'oïdium mais induit une maturation prématurée de la plante qui diminue le rendement. Un travail de sélection est alors nécessaire pour compenser ces pertes.

Aussi des stratégies plus élaborées ont été mise en œuvre pour restreindre l'inactivation du gène de sensibilité à la seule présence du pathogène. C'est le cas du gène appelé *SWEET14* du riz, qui est impliqué dans le transport au niveau cellulaire des sucres, source de carbone pour la bactérie pathogène *Xanthomonas oryzae*. Le promoteur contrôlant l'expression de ce gène a été modifié pour empêcher la fixation des protéines bactériennes qui peuvent activer la transcription de ce gène. Ainsi, les plantes montrent un certain niveau de résistance car la bactérie se trouve privée de sucre ; leur développement reste par ailleurs normal car le gène conserve son activité cellulaire en l'absence du pathogène. La même stratégie a été utilisée pour obtenir une résistance au chancre des agrumes (orange et pomelos) en modifiant le promoteur du gène de sensibilité appelé *CsLOB1*.

Alors que le parasitisme des microorganismes est tourné vers leur nutrition, la multiplication des virus dépend de la machinerie cellulaire de leur plante hôte. Aussi des résistances peuvent être imaginées en modifiant des éléments de cette machinerie. Des exemples sont fournis par des résistances naturelles, comme la résistance aux potyvirus découverte chez le piment puis dans de nombreuses espèces végétales. Cette résistance repose sur des modifications dans la séquence du gène codant pour une protéine, *EIF4E*, qui intervient dans la synthèse protéique de la cellule hôte et avec laquelle le virus interagit pour se multiplier. Ces mutations n'empêchent que ces interactions et n'affectent pas l'activité d' *EIF4E* nécessaire à la synthèse des protéines de la cellule hôte. Il est alors possible de conférer la résistance à ces virus chez une espèce sensible à partir d'un génotype résistant d'une autre espèce (7) comme illustré dans la figure 2.

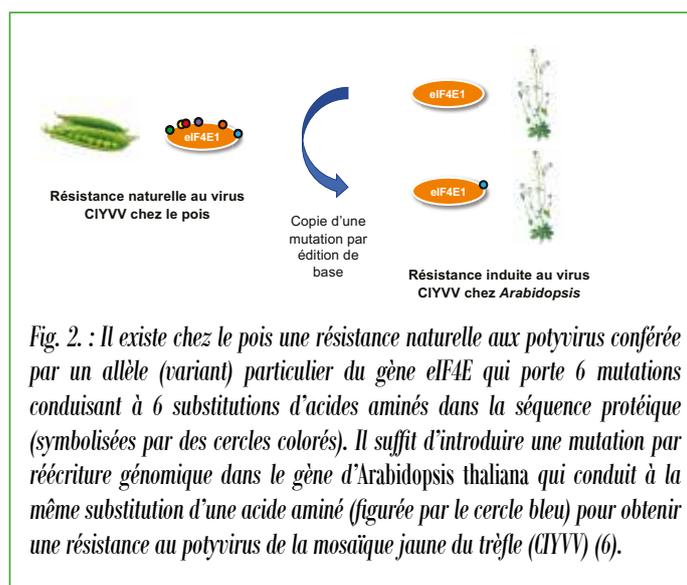


Fig. 2 : Il existe chez le pois une résistance naturelle aux potyvirus conférée par un allèle (variant) particulier du gène *eIF4E* qui porte 6 mutations conduisant à 6 substitutions d'acides aminés dans la séquence protéique (symbolisées par des cercles colorés). Il suffit d'introduire une mutation par réécriture génomique dans le gène d'*Arabidopsis thaliana* qui conduit à la même substitution d'une acide aminé (figurée par le cercle bleu) pour obtenir une résistance au potyvirus de la mosaïque jaune du trèfle (*CIYVV*) (6).

provoquer en retour des anomalies de développement plus ou moins pénalisantes pour la plante. Par exemple,

Cet exemple montre comment la connaissance précise de la fonction d'un gène, combinée aux possibilités de la réécriture génomique pour modifier sa séquence, permet d'obtenir une nouvelle résistance dans une espèce. Avec les progrès constants dans la compréhension des propriétés structurales et des mécanismes moléculaires d'action des récepteurs qui détectent la présence et l'activité du pathogène, on peut envisager que les méthodes de réécriture génomique permettront aussi dans un proche avenir la modification des gènes de résistance (R) pour leur conférer un plus large spectre de

reconnaissance des pathogènes et par conséquent une plus grande durabilité.

LES CONTRAINTES DES MÉTHODES DE LA RÉÉCRITURE GÉNOMIQUE

Le développement de ces méthodes se heurte à des obstacles de natures diverses :

- Sur le plan technique, la cellule végétale dans laquelle on introduit les réactifs nécessaires à la réécriture génomique doit être capable de régénérer ultérieurement une plante. Or, seulement un nombre limité d'espèces végétales se prêtent facilement à ces techniques de culture cellulaire. Si les réactifs sont introduits sous forme de transgènes qui s'intègrent au génome, cela implique qu'ils soient éliminés par ségrégation dans la descendance. Ceci n'est pas réalisable si l'on veut préserver les caractéristiques d'une variété reproduite par voie de multiplication végétative, comme c'est le cas de la vigne, du pommier ou de la pomme de terre par exemple. On peut alors faire en sorte que ces transgènes soient exprimés de façon transitoire ou introduire les complexes « Cas9-ARN » préassemblés dans des cellules débarrassées de leur paroi (protoplastes de tabac, laitue, le riz, vigne, pommier, pomme et la pomme de terre), ou dans des cellules embryonnaires par bombardement (maïs et blé), ou dans des zygotes après fécondation *in vitro* (cas du riz). Un savoir-faire inégalement maîtrisé.
- Sur le plan de la sécurité sanitaire et environnementale, certains s'attardent sur les dangers potentiels de l'induction de mutations ailleurs dans le génome qu'au niveau de la séquence cible. Chez les plantes, ces mutations « hors-cible » sont en nombre dérisoire comparé à celui des mutations induites par milliers par les méthodes de mutagenèse développées en sélection depuis près d'un siècle et considérées, à juste titre, comme sans danger.
- Sur le plan réglementaire, alors que ces modifications du génome sont « sans addition d'ADN étranger », l'Europe est actuellement soumise à l'arrêt de la Cour de justice européenne du 25 juillet 2018 qui classe les produits de la réécriture génomique dans la catégorie des Organismes génétiquement modifiés soumis à réglementation, alors que dans d'autres régions du monde (les Amériques par exemple), les premiers produits commercialisés ne sont pas ainsi considérés. Il est clair qu'un tel classement signifie pour la majorité des pays d'Europe une totale absence de développement de variétés végétales provenant de ces méthodes, laissant le leadership à la République populaire de Chine et à certains pays du continent américain. Une actualisation des directives

et règlements européens élaborés il y a plus de trente ans, à l'aune des connaissances scientifiques s'impose pour échapper à une telle censure.

- Sur le plan juridique et commercial se pose pour les sélectionneurs la question des droits de propriété intellectuelle sur les méthodes et outils de réécriture du génome. Pour les utilisateurs des variétés qui en dérivent, quel sera le régime auquel elles seront soumises : pour ce qui concerne l'Europe, le système original du Certificat d'obtention végétale (COV) qui laisse une liberté d'usage pour les sélectionneurs et les producteurs sera-t-il préservé ?

EN CONCLUSION

Les dernières années ont montré que les nouvelles possibilités de modification ciblée des génomes sont un puissant stimulateur de la recherche dans le domaine de la génomique végétale. Le développement en Europe de ces recherches et des applications qui pourront en résulter est fortement dépendant de décisions politiques à venir. Il est à souhaiter pour le secteur de la production de semences, où la recherche de résistances génétiques aux parasites et pathogènes est une activité majeure, que ces décisions ne seront pas, par idéologie, de nature à objectivement favoriser les ennemis des cultures.

RÉFÉRENCES

- (1) Savary S *et al.* (2019) The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution* 430 : 430–439.
- (2) Sears ER (1944) The amphidiploids *Aegilops cylindrica* x *Triticum durum* and *Aegilops ventricosa* x *T. durum* and their hybrids with *T. aestivum*. *Journal of Agricultural Research* 68 : 135-144.
- (3) Jorgensen JH (1992) Discovery, characterization and exploitation of Mlo powdery mildew resistance in barley. *Euphytica* 63 : 141-152.
- (4) Jinek M *et al.* (2012) A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science* 337 : 816-821.
- (5) Anzalone A V *et al.* (2019) Search-and-replace genome editing without double-strand breaks or donor DNA. *Nature* 576 : 149–157.
- (6) Zhang Y *et al.* (2018) Applications and potential of genome editing in crop improvement. *Genome Biology* 19 : 210 .
- (7) Bastet A. *et al.* (2019) Mimicking natural polymorphism in eI4E by CRISPR-Cas9 base editing is associated with resistance to potyviruses. *Plant Biotechnology Journal* 17 : 1736–1750.

Risques de maladies et ravageurs émergents et rôle d'une organisation régionale de protection des végétaux



Françoise Petter, agronome de formation, a d'abord travaillé dans un service régional de l'Organisation nationale de la protection des végétaux (ONPV) française 1986 à 2002 avant de rejoindre la sous-direction de la qualité et de la protection des végétaux de la Direction générale de l'alimentation (DGAL-SDQPV). En 2003, elle a rejoint l'Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes (OEPP) en tant que directrice adjointe. Elle est en charge de la coordination et la mise en œuvre du programme de diagnostic et d'analyse des risques liés aux organismes nuisibles avec le soutien d'une équipe d'adjoints scientifiques. Elle assiste le directeur général



sur des questions plus générales.

Muriel Suffert, agronome de formation, travaille pour l'OEPP depuis 2003 en tant qu'adjointe scientifique, notamment sur l'analyse de risque et la documentation sur les organismes nuisibles.

Résumé : Au cours de leur histoire, les sociétés humaines ont été confrontées à l'émergence de nouvelles maladies ou de nouveaux ravageurs des plantes qui ont menacé leur alimentation et leur environnement. Deux exemples historiques sont souvent cités du fait de leurs conséquences désastreuses, le mildiou de la pomme de terre (*Phytophthora infestans*) qui a provoqué une famine sans précédent en Irlande suivie d'une émigration massive dans les années 1840, et le Phylloxera de la vigne (*Daktulosphaira vitifoliae*) introduit en France à la fin du XIX^e siècle avec des plants de vigne importés des États Unis, entraînant faillites, abandon de domaines et une modification profonde du paysage viticole français. A la suite de ces désastres phytosanitaires, des organismes de contrôle et de surveillance nationaux et supra-nationaux ont été mis en place à partir de la fin du XIX^e siècle en France et en Europe. C'est le cas notamment de l'Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes (OEPP) dont les activités d'analyse du risque phytosanitaire et de communication, en particulier la nécessité d'alerte précoce, sont expliquées dans cet article.

LES MENACES PHYTOSANITAIRES : LES ORGANISMES NUISIBLES ÉMERGENTS, UNE HISTOIRE QUI SE RÉPÈTE.

On utilise le terme organisme nuisible émergent pour désigner à la fois des organismes déjà connus dont l'incidence ou la répartition géographique est en nette augmentation, ceux qui attaquent de nouvelles plantes hôtes à la suite de leur introduction dans de nouvelles zones, ou des organismes nuisibles nouvellement décrits. L'émergence d'organismes nuisibles pour les

plantes constitue une menace pour la sécurité alimentaire et la biodiversité. Dans les dernières décennies, de nombreux organismes nuisibles émergents sont apparus dans différentes parties du monde, et ce phénomène semble s'accélérer. Parmi les maladies et ravageurs qui ont émergé récemment en Europe, on peut citer :

- *Phytophthora ramorum* dans les plantations de mélèzes du Japon (*Larix kaempferi*) en Irlande et au Royaume-Uni.
- Le dépérissement du frêne dû à l'ascomycète *Hymenoscyphus fraxineus* qui se dissémine depuis le Nord de l'Europe.
- La bactérie *Xylella fastidiosa* qui a tué des milliers d'oliviers (*Olea europea*) en Italie (Pouilles) (Fig. 1),
- La mouche d'origine asiatique *Drosophila suzukii*, introduite en 2010, et qui menace la production de fruits rouges.
- La mineuse de la tomate (*Tuta absoluta*), insecte originaire d'Amérique du Sud, qui s'est disséminée très rapidement dans la région OEPP après son introduction en 2008 en Espagne. Cet insecte était recommandé pour réglementation par l'OEPP dès 2004.
- La punaise diabolique *Halyomorpha halys* insecte polyphage d'origine asiatique qui a été introduit d'abord aux États Unis en 2001 puis en Europe en 2007 (Suisse). Après plusieurs années de présence dans notre région elle cause des dégâts importants en production fruitière.
- Le virus du fruit rugueux brun de la tomate (Tomato brown rugose fruit virus, ToBRFV), nouveau



Fig. 1 : Symptômes de dépérissement rapide de l'olivier (Pouilles, IT), ©Françoise Petter EPPO). **Fig. 2** : Symptômes typiques de ToBRFV sur fruit de tomates, ©Dr Aviv Dombrovsky (IL). **Fig. 3** : Verticille de Maïs attaqué par une larve de *Spodoptera frugiperda* ©Boni B. Yarou.

virus de la tomate et des poivrons (Fig. 2) signalé par des chercheurs Jordaniens en 2015 et qui a depuis été détecté simultanément dans différentes régions du monde en 2019/2020.

- Enfin, au niveau mondial la chenille légionnaire d'automne (*Spodoptera frugiperda*) originaire des Amériques qui s'est rapidement disséminée en Afrique, au Proche-Orient, en Asie et dans le Pacifique (FAO, 2020) et qui peut provoquer d'importants dégâts sur les cultures. La légionnaire d'automne préfère le maïs (Fig. 3), mais peut se nourrir de plus de 80 autres types de plantes, dont le riz, le sorgho, le millet, la canne à sucre, le coton ou des cultures potagères, et menace la sécurité alimentaire dans certaines régions du monde.

Les causes de l'émergence de nouveaux organismes sont multiples et assez complexes (1). Les activités humaines jouent un rôle important, notamment le commerce des végétaux, l'introduction accidentelle de vecteurs, les modifications des pratiques culturales ou l'introduction de nouvelles cultures. L'augmentation des échanges de produits végétaux sur de longues distances est indiscutablement une des raisons de l'augmentation des émergences, de même que le changement climatique. La détection des organismes nuisibles émergents est facilitée dans les pays qui ont des observateurs bien informés dans le domaine de la santé des végétaux, la capacité de réaliser des enquêtes, et une capacité de diagnostic développée. Comme pour toute maladie émergente (végétale ou animale), une des difficultés est que l'on dispose généralement de peu d'information concernant les organismes impliqués. Une alerte précoce repose sur l'identification d'une menace le plus rapidement possible, la diffusion d'informations sur cette menace, permettant ainsi une gestion des risques, la planification de mesures d'urgence

et leur adaptation aux différentes phases de « l'épidémie ». Quand la détection des organismes nuisibles est trop tardive (ce qui est souvent le cas), l'enrayement est généralement la seule stratégie de gestion réaliste : les mesures visent à ralentir la progression de l'épidémie et non à l'éradiquer. Il est donc essentiel d'agir en amont pour rendre possible la prévention du risque (par exemple par l'inspection à l'importation), d'avoir des stratégies de surveillance du territoire et des plans d'urgence pour l'éradication du nouvel organisme nuisible.

LA MISE EN PLACE DE STRUCTURES POUR LUTTER CONTRE LES MENACES PHYTOSANITAIRES

À la fin du XIX^e siècle, la nécessité d'empêcher la dissémination d'organismes nuisibles à la santé des plantes lors du transport de végétaux d'un pays à l'autre a été reconnue par les gouvernements avec l'adoption de conventions internationales telles que la Convention internationale contre le Phylloxera en 1881, et la Convention internationale pour la protection des plantes en 1929. Après la seconde guerre mondiale, une collaboration intergouvernementale plus permanente s'est développée et ces conventions ont été remplacées en 1951 par la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV), qui sera révisée en 1979 et 1997. La mise en œuvre de la CIPV implique la collaboration des organisations nationales de protection des végétaux (services officiels établis par les gouvernements pour remplir les fonctions spécifiées par la CIPV). Son préambule reconnaît « la nécessité d'une coopération internationale en matière de lutte contre les organismes nuisibles aux végétaux et aux produits végétaux, et afin de prévenir leur dissémination internationale et spécialement leur introduction dans des zones menacées ». La CIPV, est signée aujourd'hui par 184 pays (décembre 2020). Elle

visé à protéger les ressources végétales mondiales contre la dissémination et l'introduction d'organismes nuisibles, et à promouvoir la sécurité des échanges commerciaux. Les normes internationales pour les mesures phytosanitaires (NIMP) sont l'outil principal de la Convention pour atteindre ses objectifs, et en font la seule organisation mondiale de normalisation en matière de santé des végétaux. Les organismes nuisibles sont définis comme suit : « toute espèce, souche ou biotype de végétal, d'animal ou d'agent pathogène nuisible aux végétaux ou produits végétaux » (c'est-à-dire les bactéries, champignons, insectes, plantes, virus...). La CIPV est l'une des « trois sœurs » reconnues par l'Accord sur les mesures sanitaires et phytosanitaires (SPS) de l'Organisation mondiale du commerce (OMC), avec la Commission du Codex Alimentarius pour les normes de sécurité alimentaire et l'Organisation mondiale de la santé animale (OIE) pour les normes de santé animale.

LA NÉCESSITÉ DE COLLABORATIONS RÉGIONALES

Dix Organisations régionales de protection des végétaux (ORPV) ont été créées depuis 1951. Elles fonctionnent comme des organes de coordination au niveau de 10 grandes « régions » du monde. Ce sont des organisations intergouvernementales (leurs membres officiels sont des pays et non des individus). La plupart d'entre elles ont été fondées à l'initiative de gouvernements, tandis que d'autres sont administrées par les bureaux régionaux de la FAO. La plupart des pays du monde font partie d'une ou plusieurs ORPV qui coopèrent étroitement entre elles, et se réunissent une fois par an. Les ORPV participent également activement avec leurs pays membres à la préparation des NIMP.



L'Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes (OEPP) est la plus ancienne des organisations régionales. La Convention OEPP a été signée le 18 avril 1951 par 15 pays membres, et compte, en 2020, 52 pays membres comprenant presque tous les pays d'Europe, du pourtour méditerranéen ainsi que de l'Asie centrale. L'organisation a pour rôle principal d'aider ses pays membres à empêcher l'introduction ou la dissémination d'organismes nuisibles dangereux. Elle est donc chargée d'identifier les organismes nuisibles susceptibles de présenter un risque pour la région (alerte précoce pour les organismes émergents), de les évaluer et de faire des propositions sur les mesures phytosanitaires susceptibles d'atténuer le risque. Pour effectuer ce travail, l'OEPP s'appuie sur des panels (groupes techniques

composés d'experts nationaux) et sur un Secrétariat scientifique. Sur certaines questions spécifiques, l'OEPP peut former des groupes ad-hoc d'experts, c'est le cas pour la réalisation des analyses du risque phytosanitaire (voir plus bas).

DANS CE CONTEXTE QUE FONT LES DIFFÉRENTS ACTEURS DE L'OEPP : LES MOYENS MIS EN ŒUVRE

Dans les 52 pays de l'OEPP, l'agriculture est un secteur économiquement important qui couvre implique l'utilisation d'une grande variété de plantes. Celles-ci font l'objet d'un commerce toujours croissant et sont potentiellement menacées par un large éventail de ravageurs et de maladies. Il est donc essentiel d'éviter l'introduction et la propagation de nouveaux organismes nuisibles via les échanges commerciaux. Dans la stratégie de l'OEPP 2021-2025, le premier objectif est d'améliorer la protection phytosanitaire par l'identification précoce des organismes émergents, l'évaluation des risques qui leur sont associés et, le cas échéant, la proposition de mesures de gestion de ces organismes (exigences relatives aux mouvements de végétaux et produits végétaux, l'éradication et l'enrayement).

Alerte précoce

Lorsque de nouveaux organismes nuisibles apparaissent, il est important d'alerter précocement les Services de protection des végétaux afin qu'ils puissent mettre en place des inspections à l'importation et une surveillance sur leur territoire. À la demande de ses membres, l'OEPP a donc créé en 1999 une liste d'alerte dont l'objectif premier est d'attirer l'attention des organisations nationales (ONPV) sur des ravageurs, maladies, plantes exotiques envahissants et préoccupants. Cette liste sert également à la proposition de candidats pour la réglementation phytosanitaire dans les pays de l'OEPP (voir plus bas). La liste d'alerte fait l'objet d'une revue critique par différents panels de l'OEPP chaque année. Les organismes figurant sur cette liste sont sélectionnés principalement sur la base de la littérature scientifique et d'internet, mais aussi des suggestions faites par les organisations nationales (ONPV). Sont également utilisées les informations fournies par d'autres systèmes d'alerte, par exemple, ceux de l'EFSA (*European Food Safety Authority*), de la CIPV, ProMED, *North American NAPPO Phytosanitary Alert System*. L'ajout d'un organisme sur la liste d'alerte dépend de diverses raisons : organismes nuisibles nouveaux pour la science, nouveaux foyers signalés en Europe et ailleurs, rapports de dissémination rapide, ou modifications du comportement d'un orga-

¹CABI est une organisation créée en 1910 sous le nom de Commonwealth Agricultural Bureau (<https://www.cabi.org>)

nisme nuisible. L'addition à la liste d'alerte est marquée par la publication d'une courte fiche dans le Service d'information (mensuel) et sur le site internet de l'OEPP. Le Service d'information synthétise également sous forme de courts articles l'évolution de la situation des organismes réglementés. Pour arriver à identifier précocement des risques de maladies ou ravageurs émergents, il est important d'avoir une vision claire de la situation phytosanitaire sur son territoire, et en particulier une bonne connaissance de la répartition géographique des organismes nuisibles. À cette fin, l'OEPP maintient des cartes de répartition de nombreux organismes nuisibles (en collaboration avec CABI* et une base de données, *Global Database* (gd.eppo.int)). Par exemple, parmi les organismes listés en haut dans la liste d'alerte de l'OEPP, certains ont été recommandés pour réglementation afin d'éviter leur introduction ou leur dissémination par des mesures visant les mouvements de végétaux et produits végétaux susceptibles d'être infestés.

Nouvelles méthodes d'identification des risques

La réglementation phytosanitaire en Europe se réfère principalement à des organismes nuisibles spécifiques. Cependant, l'identification de menaces potentielles dans d'autres régions du monde, susceptibles d'être introduites par des marchandises importées peut constituer une approche plus efficace. À titre d'exemple, les études conduites par l'OEPP dès 2012 sur la tomate (3), les cultures fruitières (4), et le bois de feuillus (3) ont permis d'identifier les organismes nuisibles qui ensuite a permis une analyse spécifique du risque phytosanitaire.

Par ailleurs, les organismes ne posant pas de problème dans leur zone d'origine peuvent se révéler très nuisibles en arrivant dans une autre partie du monde. Une analyse détaillée des invasions biologiques (6) montre qu'un quart des premiers signalements d'espèces nuisibles non indigènes correspondent à des organismes nuisibles qui n'étaient pas considérés comme tels avant leur introduction dans une nouvelle zone. L'utilisation de « plantes sentinelles » fournit un bon outil d'alerte précoce pour identifier de nouveaux organismes nuisibles potentiels (7, 8). Cette approche a été développée notamment pour les plantes ligneuses pérennes (arbres et arbustes forestiers ornementaux et fruitiers), et l'OEPP a adopté en 2020 une norme sur ce sujet (9).

Analyse du risque phytosanitaire (ARP) : rôle de l'OEPP

L'OEPP joue depuis longtemps un rôle important dans l'évaluation du risque mais fournit également des recommandations sur la gestion du risque (mesures efficaces à prendre pour réduire les risques par rapport aux coûts et l'acceptabilité sociale). Les premières listes d'organismes

nuisibles recommandés pour réglementation par les pays membres ont été approuvées en 1975 et sont amendées chaque année. Jusqu'en 2000, l'ajout d'organismes nuisibles aux listes de l'OEPP était proposé par les gouvernements membres et étaient basés sur une documentation scientifique et l'avis d'experts. Les méthodes d'évaluation des risques ont été structurées par des normes régionales et internationales définissant ce que les ARP devaient contenir comme informations pour justifier la mise en place de réglementations internationales. De 2000 à 2006, l'ajout d'un organisme nuisible aux listes de l'OEPP a été basé sur une ARP fournie par un pays membre. Dans la mesure où tous les pays de la région ne disposent pas des ressources nécessaires pour réaliser des ARP, ils ont souhaité que l'OEPP joue un rôle actif dans la réalisation des ARP, afin de partager les coûts et la charge de travail et de fournir une justification technique pour la réglementation de certains organismes nuisibles. En 2006, un nouveau système a été mis en place et des groupes d'experts dédiés à la réalisation de chaque ARP ont été établis. Les ARP effectuées dans ce système comprennent à la fois une évaluation des risques et l'identification des options de gestion de ces risques. Elles sont menées pour une zone clairement définie, généralement la région OEPP, et la partie menacée de cette zone est spécifiée dans l'ARP. Les analyses préparées par les groupes d'experts sont revues par des panels de l'OEPP, en particulier en ce qui concerne des mesures de gestion. Les priorités sont décidées chaque année pour l'année suivante, tout en gardant la souplesse nécessaire pour mener une ARP en urgence si nécessaire. Chaque année en septembre, le conseil de l'OEPP approuve l'ajout de nouveaux organismes nuisibles sur les listes de l'OEPP sur la base de ces ARP. Chaque pays membre doit ensuite décider des options de gestion qu'il souhaite appliquer.

L'OEPP a créé une plateforme en 2018 (<https://pra.eppo.int/>) qui vise à partager les évaluations du risque sur tous les types d'organismes nuisibles aux végétaux. Les évaluations, qui peuvent être dans des langues autres que l'anglais, comprennent des ARP nationales produites par les pays membres ainsi que des analyses régionales par l'OEPP ou l'EFSA. De nouveaux documents sont régulièrement publiés ; en novembre 2020, plus de 1 300 documents étaient disponibles. L'exemple des activités conduites par l'OEPP, de l'alerte à la recommandation pour réglementation, est illustré dans la figure 4 pour le virus du fruit rugueux brun de la tomate (ToBRFV).

En dehors de l'alerte précoce et de l'analyse du risque qui aident à être prêts lorsqu'un organisme nuisible est

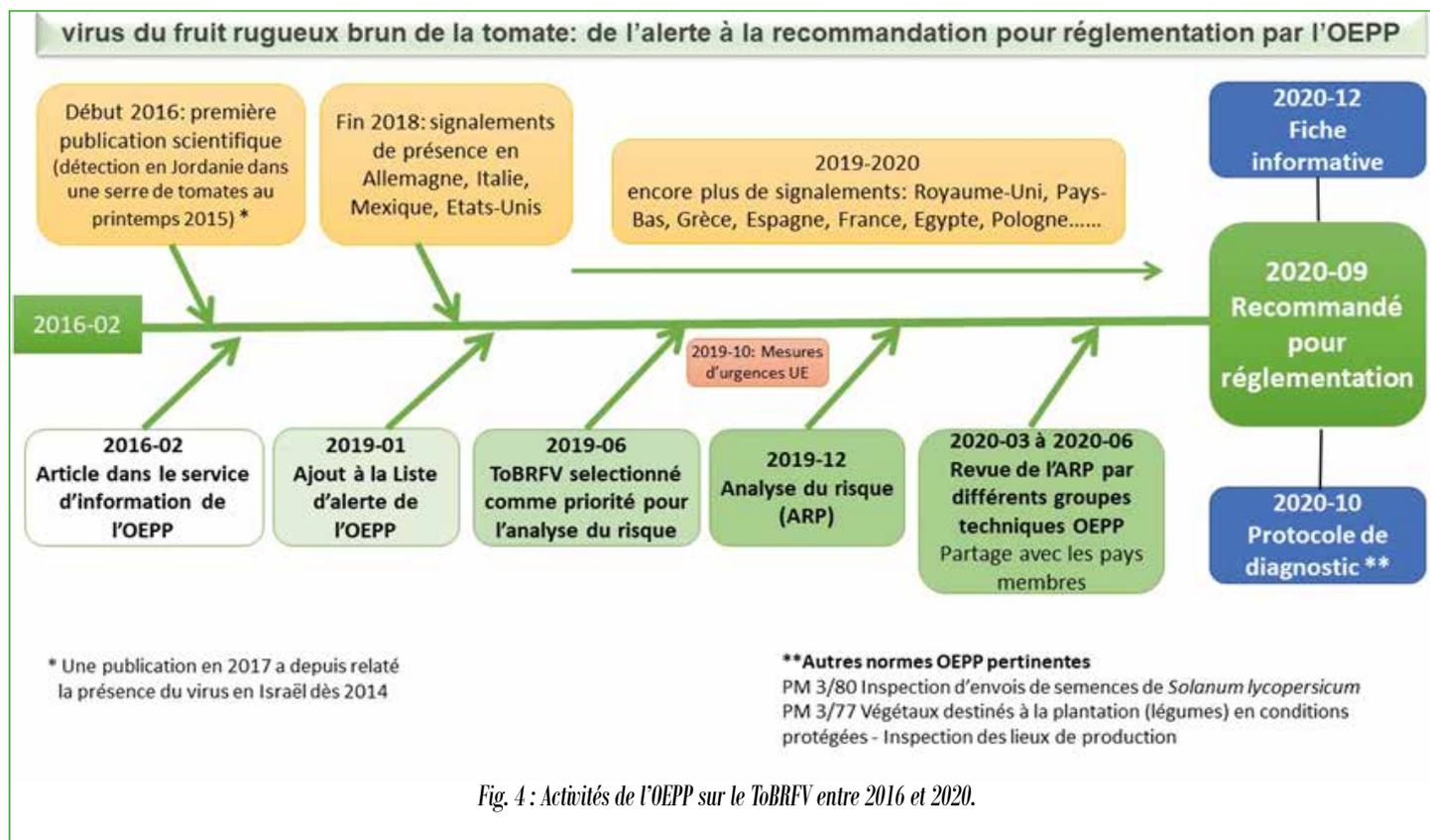


Fig. 4 : Activités de l'OEPP sur le ToBRFV entre 2016 et 2020.

détecté dans un pays, il convient également de donner des conseils sur la façon de détecter rapidement via la surveillance et le diagnostic et contrôler rapidement via les plans d'urgence. Ainsi, lorsqu'un organisme est recommandé pour réglementation, des normes OEPP peuvent également être développées sur le diagnostic, l'inspection et la surveillance, les programmes d'éradication et d'enrayement.

Analyse du risque phytosanitaire (ARP) : rôle de l'EFSA
L'EFSA par le biais de son groupe sur la santé des plantes réalise des évaluations des risques phytosanitaires afin de délivrer des avis scientifiques à la Commission européenne. L'EFSA et l'OEPP ont conclu un accord pour ne pas faire double emploi et l'OEPP utilise régulièrement les résultats des évaluations de risques de l'EFSA comme base de ses recommandations. L'EFSA de son côté utilise la base de données *Global Database* de l'OEPP sur la répartition géographique et les plantes hôtes, ainsi que les fiches informatives de l'OEPP, pour réaliser les réévaluations des organismes de quarantaine de l'Union européenne (« catégorisations »). Toutefois, il existe des différences dans les approches utilisées : par exemple, l'EFSA essaie de quantifier les risques, alors que l'OEPP a une approche plus qualitative tout en mettant en avant les filières à risque. Aussi, l'OEPP couvre une zone plus vaste que l'EFSA (qui se limite à l'UE). Par ailleurs l'EFSA se concentre sur l'évaluation

des risques et non sur leur gestion. En effet, pour les états de l'UE, cette séparation est fondamentale et inscrite dans le droit européen. La gestion des risques est décidée par le Comité permanent « Santé des plantes » de la Commission européenne, qui est composé de représentants des différents États membres, sur la base des évaluations de l'EFSA et les ARP de l'OEPP.

Communication sur les risques émergents

La stratégie de l'OEPP pour 2021-2025 prévoit d'améliorer encore la mise à disposition d'informations et la communication, tout d'abord avec les autorités de ses pays membres, dont les ONPV, mais aussi avec les autres parties prenantes notamment dans le domaine de la réglementation phytosanitaire. En effet, bien que la cible première de la communication de l'OEPP soit les autorités officielles des pays membres, l'OEPP vise également à aider ses membres à mieux communiquer auprès des opérateurs (agriculteurs, sylviculteurs, ...) et du grand public sur l'importance de la santé des végétaux ainsi que sur les risques phytosanitaires. Une campagne pour sensibiliser les voyageurs au risque de rapporter des plantes de leurs voyages a été initiée dès 2013 par l'OEPP (traduite en plus de vingt langues), et une norme OEPP sur la « sensibilisation du public aux organismes nuisibles de quarantaine et émergents » a été développée en 2019. L'OEPP produit également du matériel d'information (affiches, brochures) pour les organismes nuisibles

nouvellement recommandés pour une réglementation. Ce matériel, disponible sur le site Internet : https://www.eppo.int/RESSOURCES/eppo_publications/pest_specific_posters, peut être librement adapté et utilisé par les pays membres pour mener leurs propres campagnes publicitaires.

ORGANISMES NUISIBLES ÉMERGENTS DES VÉGÉTAUX ET DES ANIMAUX : UN MÊME COMBAT

L'année 2020 a été proclamée par les Nations-Unies « année internationale de la santé des végétaux » afin de sensibiliser le monde entier à la manière dont la protection phytosanitaire peut contribuer à éliminer la faim, à réduire la pauvreté, à protéger l'environnement et à impulser le développement économique. En dépit du fait que les actions prévues dans ce cadre ont souvent dû être annulées à cause de la COVID-19, cette crise sanitaire a contribué à sensibiliser les différents acteurs et notamment le grand public à la nécessité de mettre en œuvre des moyens de prévention et de lutte contre tous les organismes nuisibles émergents, qu'ils soient des menaces pour les végétaux ou les animaux :

- La surveillance est importante pour détecter les foyers rapidement et chacun peut y jouer un rôle.
- Analyser le risque n'est pas toujours facile et les avis scientifiques divergent.
- Les gestionnaires du risque doivent prendre des décisions rapidement avec des incertitudes.
- On doit souvent revoir les mesures à mesure que l'on connaît mieux la maladie et ce n'est pas toujours facile à faire accepter.
- Avoir des plans d'urgence facilite la mobilisation des chaînes de gestion du risque (notamment une mobilisation rapide des laboratoires d'analyse),
- Connaître les caractéristiques des maladies aide à les combattre efficacement.
- La recherche est importante pour trouver des solutions.

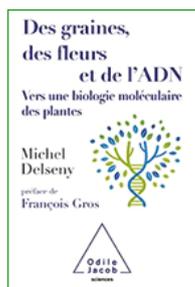
- La prévention est essentielle.
- Il faut parfois prendre des mesures de quarantaine qui restreignent les mouvements.
- Une communication rapide et transparente quant à la situation dans les territoires est essentielle pour limiter les risques et informer les autres pays.

Dans de telles situations tous les acteurs ont un rôle à jouer.

RÉFÉRENCES

- (1) van Haute E, Paping R & Ó Gráda C (2006) The European subsistence crisis of 1845-1850: a comparative perspective, IEHC 2006 Helsinki Session 123 <https://doi.org/10.1484/M.CORN-EB.4.00017>
- (2) Pautasso M, Schlegel M & Holdenrieder O (2015). Forest health in a changing world. *Microbial Ecology* 69 : 826–842.
- (3) Grousset F, Suffert M & Petter F (2015) EPPO Study on pest risks associated with the import of tomato fruit. *EPPO Bulletin* 45 : 153–156.
- (4) Suffert M, Wilstermann A, Petter F, Schrader G & Grousset F (2018) Identification of new pests likely to be introduced into Europe with the fruit trade. *EPPO Bulletin* 48 : 144-154.
- (5) Grousset F, Grégoire JC, Jactel H, Battisti A, Benko Beloglavec A, Hrašovec B, Hulcr J, Inward D, Orlinski A & Petter F (2020) The risk of bark and ambrosia beetles associated with imported non-coniferous wood and potential horizontal phytosanitary measures. *Forests* 11 : 342.
- (6) Seebens et al., (2018) Global rise in emerging alien species results from increased accessibility of new source pools. *PNAS* 115 : E2264–E2273.
- (7) Eschen R, O'Hanlon R, Santini A, Vannini A, Roques A, Kirichenko N & Kenis M (2019). Safeguarding global plant health: the rise of sentinels. *Journal of Pest Science* 92 : 29-36.

Des graines, des fleurs et de l'ADN. Vers une biologie moléculaire des plantes de Michel Delseny, 2020. Odile Jacob, 368 pages.



Ce livre, préfacé par François Gros, retrace l'histoire de la biologie moléculaire et de la génomique végétale au cours des cinquante dernières années. C'est aussi le témoignage d'une vie de chercheur. Il y décrit sa phase d'apprentissage du métier de chercheur et expose l'état des connaissances au début des années 70, ainsi que quelques notions techniques nécessaires pour comprendre les problèmes posés et les enjeux des recherches. Il décrit ensuite l'essor de la biologie moléculaire végétale, au cours des années 80, avec le clonage et la caractérisation des premiers gènes de plantes et illustre la façon dont cette période a été vécue dans son laboratoire, en France et dans le reste du monde. Il montre comment se nouent les contacts entre chercheurs et comment s'est peu à peu imposé le modèle *Arabidopsis thaliana*, l'équivalent pour les plantes de la drosophile pour les animaux. On y découvre comment la biologie moléculaire a commencé à aborder des questions de physiologie telles que la germination des graines ou l'adaptation aux stress. Un chapitre est entièrement consacré à l'aventure du décryptage du génome d'*Arabidopsis* et à ce qu'il a apporté sur le plan des connaissances dans quelques domaines clés de la biologie végétale.

Le séquençage du génome d'*Arabidopsis*, en 2000, a marqué un tournant dans les recherches sur les plantes. Les conséquences sur les politiques de recherche dans notre pays, avec le lancement de grands programmes tels que Génoplante et le Réseau des génopoles, puis de l'ANR, sont ensuite abordées, amenant à l'explosion de la génomique et à une rénovation complète de la physiologie végétale. Un autre chapitre illustre le séquençage du deuxième génome végétal, celui du riz, et sa préparation au travers de collaborations internationales. Les révolutions technologiques qui ont permis de passer du séquençage laborieux des premiers génomes de plantes à celui de plus de 400 espèces en l'espace de quelques années seulement sont ensuite décrites. Les conséquences de cette avalanche de données sur nos connaissances en matière de biodiversité et d'évolution sont discutées. Enfin les défis et perspectives de ces recherches en termes d'amélioration des plantes sont évoqués avec l'utilisation des marqueurs moléculaires, l'obtention de plantes transgéniques et de plantes dont le génome a été édité à l'aide des ciseaux moléculaires.

Au total, ce livre donne un aperçu de ce qu'est la recherche moderne sur les plantes, du rôle qu'y ont joué les équipes du CNRS, et livre le vécu d'un chercheur passionné face aux enjeux scientifiques, économiques et sociétaux.

Michel Delseny, directeur de recherche émérite au CNRS, et membre de l'Académie des sciences.

Des plantes biotech au service de la santé du végétal et de l'environnement de Catherine Regnault-Roger, 2020. Fondation pour l'Innovation Politique, 32 pages, texte intégral disponible en ligne (www.fondapol.org/wp-content/uploads/2020/01/171-BIOTECH_II_2019-12-19_w.pdf)



Les méthodes de modification du génome sont intimement liées à l'histoire de l'humanité, des premiers balbutiements de l'agriculture au néolithique en passant par le développement des thérapies géniques. Aujourd'hui, les techniques employées sont issues des biotechnologies (transgénèse, mutagénèse ainsi que les nouvelles techniques d'édition du génome NBT, ou *New Breeding Techniques*), et suscitent un débat sociétal empreint d'inquiétude ou de rejet idéologique.

Ces craintes sont-elles fondées ? Les avancées scientifiques que propose cette approche biotechnologique méritent d'être prises en considération, tout particulièrement en matière de santé. Aujourd'hui, la mondialisation a souligné que les santés, qu'elles soient humaine ou animale, végétale ou environnementale, sont interdépendantes et réunies sous le concept *One Health* : une seule santé, un seul monde.

Après avoir situé les modifications du génome dans le contexte de la vie sur notre planète et les progrès qu'elles offrent en matière de santé humaine et animale ainsi que les espoirs que ces techniques suscitent, nous examinerons dans cette note les innovations qui relèvent du domaine de la santé du végétal et quelles sont les conséquences environnementales que posent réellement les plantes biotechnologiques.

Catherine Regnault-Roger est professeur émérite à l'université de Pau et des Pays de l'Adour et membre de l'Académie d'agriculture de France.

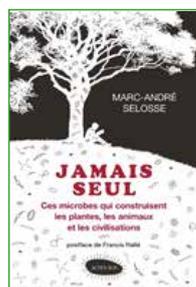
La symbiose. Structures et fonctions, rôle écologique et évolutif de Marc-André Selosse 2000. Vuibert, 160 pages,



On parle de symbiose lorsque deux organismes vivent ensemble, en une association réciproquement bénéfique. La symbiose apparaît aujourd'hui comme un moteur essentiel dans la physiologie des organismes (animaux, végétaux et microorganismes) et surtout dans leur écologie et leur évolution. L'auteur explique ici les exemples

classiques de symbiose et aborde les avancées les plus récentes dans les connaissances scientifiques (évolution des plastes et des mitochondries, écologie des mycorhizes, dialogue entre les partenaires). L'ouvrage est divisé en cinq parties : dans le premier chapitre la notion de symbiose est établie à partir de trois exemples ; le deuxième traite de la diversité structurale et fonctionnelle des symbioses ; le troisième montre comment les symbioses agissent dans les écosystèmes ; dans le quatrième on aborde la pérennité des associations symbiotiques et le dernier démontre leur rôle majeur dans l'évolution. Illustré de figures synthétiques, l'ouvrage va à l'essentiel. Des encadrés permettent d'approfondir certains exemples, révélateurs ou attrayants. L'auteur vise une transversalité entre biologie animale et biologie végétale. Il intègre la symbiose dans les grands problèmes d'écologie, d'évolution et de physiologie.

Jamais seul. Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations. de Marc-André Selosse, 2017. Actes Sud, 368 pages.



Nous savons aujourd'hui que les microbes ne doivent plus seulement être associés aux maladies ou à la décomposition. Au contraire, ils jouent un rôle en tout point essentiel : tous les organismes vivants, végétaux ou animaux, dépendent intimement de microbes qui contribuent à leur nutrition, leur développement, leur immunité ou même leur comportement. Tou-

jours pris dans un réseau d'interactions microbiennes, ces organismes ne sont donc... jamais seuls.

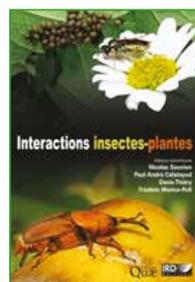
Au fil d'un récit foisonnant d'exemples et plein d'esprit, Marc-André Selosse nous conte cette véritable révolution scientifique. Détaillant d'abord de nombreuses symbioses qui associent microbes et plantes, il explore les propriétés nouvelles qui en émergent et modifient le fonctionnement de chaque partenaire. Il décrypte

ensuite les extraordinaires adaptations symbiotiques des animaux, qu'ils soient terrestres ou sous-marins. Il décrit nos propres compagnons microbiens – le microbiote humain – et leurs contributions, omniprésentes et parfois inattendues. Enfin, il démontre le rôle des symbioses microbiennes au niveau des écosystèmes, de l'évolution de la vie, et des pratiques culturelles et alimentaires qui ont forgé les civilisations.

Destiné à tous les publics, cet ouvrage constitue une mine d'informations pour les naturalistes, les enseignants, les médecins et pharmaciens, les agriculteurs, les amis des animaux et, plus généralement, tous les curieux du vivant. À l'issue de ce périple dans le monde microbien, le lecteur, émerveillé, ne pourra plus porter le même regard sur notre monde.

Interactions insectes-plantes

de Nicolas Sawion, Paul-André Calatayud, Denis Thiéry & Frédéric Marion-Poll 2013. Éditions Quae, IRD Editions, 749 pages.



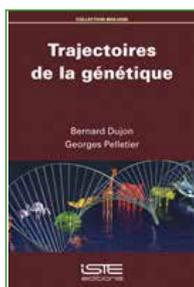
Malgré leur rôle primordial dans les écosystèmes, les insectes, qui représentent les trois quarts des espèces animales identifiées, sont encore mal connus au grand public. Leur relation avec le règne végétal et l'espèce humaine, que ce soit comme compétiteurs au niveau des cultures ou comme auxiliaires, notamment par la pollinisation, revêt pourtant une importance

majeure. Pour mieux comprendre les grandes fonctions des insectes, leur fonctionnement individuel et populationnel, leurs interactions avec les composantes de l'écosystème - en particulier les plantes - et plus globalement leur intégration dans les milieux naturels et anthropisés, cet ouvrage propose la première synthèse en français sur un domaine ayant connu récemment d'importants développements. Il offre une revue complète et actualisée des grands courants de pensée, des approches et des découvertes dans les différents champs disciplinaires : physiologie animale et végétale, éthologie, écologie chimique, biologie évolutive, agronomie, paléoentomologie...

Ce livre présente par ailleurs les multiples applications des recherches pour réduire l'impact des insectes ravageurs sur les cultures, tout en limitant l'usage des insecticides. Des questions souvent sujettes à controverse sont revisitées à la lumière des connaissances scientifiques actuelles : plantes transgéniques, impact des changements climatiques sur l'extension des aires de distribution de ravageurs ou de vecteurs... Illustrée de

nombreuses figures et photos, cette somme à vocation pédagogique s'adresse aux étudiants, enseignants et chercheurs, mais aussi à tous les lecteurs intéressés par les relations complexes entre le monde des insectes et le règne végétal.

Trajectoires de la génétique de Bernard Dujon & Georges Pelletier, 2019. ISTE Editions, 258 pages.



Alors que la génétique prend une importance croissante dans notre environnement quotidien, la méconnaissance de ses fondements scientifiques induit des sentiments mêlés d'espoirs et de craintes quant au potentiel de ses applications.

Cet ouvrage propose de découvrir les multiples facettes de la génétique, de l'humain à l'animal et au végétal en passant par le monde microscopique, à travers plus d'un siècle de progrès scientifiques. Il résume l'évolution des idées à mesure que l'organisation et le fonctionnement du matériel génétique se sont clarifiés.

Trajectoires de la génétique analyse la façon dont l'information génétique transmise de génération en génération dans les acides nucléiques permet la réalisation des fonctions biologiques et l'évolution du monde vivant. Il illustre les développements actuels dans des domaines aussi variés que l'amélioration des espèces d'intérêt agronomique, la connaissance des mondes microbiens, la prise en charge des pathologies d'origine génétique ou la synthèse de nouvelles formes de vie.

Santé du végétal : 100 ans déjà ! Regards sur la Phytopharmacie de Catherine Regnault-Roger & André Fougeroux, 2018. Presses des mines, 177 pages.



Cueillette ou agriculture, les plantes nous nourrissent, nous habillent, nous logent, nous soignent ! La santé des hommes et la santé des plantes sont deux faces d'une même médaille : pour preuve la pharmacopée riche en principes actifs dérivés de plantes pour guérir nos maux, et la phytopharmacie

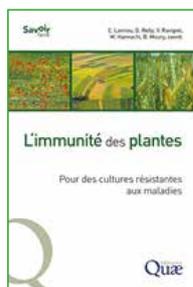
pour protéger les plantes des maladies et des agresseurs.

Il y a 100 ans, alors que Jean Jaurès proclamait « Que la science soit près du moissonneur », s'ouvrait à travers des révolutions agricoles et industrielles une nouvelle ère pour la protection des cultures. Il y a 100 ans, toute une profession s'organisait pour promouvoir une phyto-

pharmacie basée sur les connaissances scientifiques et technologiques, loin de l'empirisme qui prévalait jusqu'alors.

C'est à un examen de l'évolution de la protection des cultures et des différentes facettes de la phytopharmacie du passé au futur, sans occulter les débats présents sur les produits naturels ou de synthèse, les approches agro-écologiques, biotechnologiques et de biocontrôle que nous convie ce livre. Il croise les regards de spécialistes, tous membres de l'Académie d'agriculture de France, pour apporter un regard averti sur la santé du végétal et de son environnement.

L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies de Christian Lannou, Dominique Roby, Virginie Ravigné, Mourad Hannachi & Benoît Moury 2021. Editions Quae, 392 pages.



Les plantes disposent d'une immunité naturelle qui leur permet de résister aux maladies et aux agressions parasitaires dans leur environnement. L'invention puis le développement de l'agriculture ont cependant créé des milieux très favorables à l'émergence de nouvelles maladies et au développement des épidémies. Cette vulnérabilité

sanitaire s'est ensuite accentuée avec l'intensification agricole, à partir des années 1950, de sorte que le recours généralisé aux pesticides de synthèse est devenu un pilier essentiel de la production. Ce modèle est désormais remis en cause et le développement d'une protection agroécologique des cultures devient une nécessité.

Comprendre comment fonctionne l'immunité des plantes et déchiffrer leur arsenal de défense face aux agressions parasitaires est essentiel pour produire des variétés résistantes et réduire la dépendance de l'agriculture à la protection chimique. Mais il faut compter avec la formidable capacité d'adaptation des populations pathogènes, qui conduit les chercheurs à imaginer des stratégies complexes pour maintenir efficace la résistance des variétés cultivées. Les gènes qui confèrent la résistance aux plantes commencent à être perçus comme un bien commun à préserver absolument.

Cet ouvrage explicite les concepts fondamentaux et s'appuie sur des études de cas pour réaliser une synthèse très complète des travaux en biologie, en modélisation et en sciences sociales sur ce qu'est l'immunité végétale et sur la manière dont elle pourrait concourir à une agriculture respectueuse de l'environnement.



André et Christiane Perrin sont chimistes de l'état solide. Tous deux directeurs de recherches au CNRS (en retraite), ils ont effectué toute leur carrière au sein de l'université de Rennes 1. Depuis plusieurs années, ils se sont investis dans des expositions à la Bibliothèque sciences de l'université de Rennes-Beaulieu, dans le cadre des années internationales de l'ONU : années de la chimie (2011), de la cristallographie (2014), de la lumière (2015), des légumineuses (2016), de la classification périodique des éléments de Mendeleiev (2019) et de la santé des plantes (2020). Ils sont également membres de l'European Academy of Sciences



(EurASc), de la Société chimique de France et de l'Association des anciens et amis du CNRS (A3 CNRS, dont André Perrin est représentant régional pour la région Bretagne-Pays de la Loire).

Maladies emblématiques

LE MILDIOU DE LA POMME DE TERRE

Phytophthora infestans est une maladie cryptogamique causée par un oomycète.

Les spores de ce micro-organisme hivernent sur des tubercules infectés et sont rapidement disséminées par temps chaud et humide.

Elles se développent sur les feuilles et se diffusent dans la culture.

Elles peuvent être entraînées dans le sol par la pluie ou transportées par le vent sur de longues distances. Les tubercules infectés développent des taches grises ou noires et pourrissent rapidement, devenant impropres à la consommation.



Symptôme de mildiou sur des feuilles de pomme de terre.
© Wikipedia



Tubercule de pomme de terre atteinte par le mildiou.

Cette maladie fut responsable de la grande famine européenne des années 1840.

La faible taille des exploitations agricoles, la monoculture intensive et l'apparition du mildiou importé par des tubercules contaminés sont les principales causes de cette catastrophe.

La grande famine irlandaise des années 1845-1851 provoqua la mort de plus d'1 million de personnes ainsi que l'émigration de 2 autres millions d'Irlandais. Suite à ce fléau, des efforts concertés entre sélectionneurs européens et nord-américains ont permis une production massive de pommes de terre au 20^e siècle.

LE PHYLLOXÉRA DE LA VIGNE



Carte du phylloxéra en France en 1882

Daktulosphaira vitifoliae est une espèce d'insectes hémiptères de la famille des *Phylloxeridae*, sorte de pucerons ravageurs de la vigne.

L'infestation d'un cep de vigne par le phylloxéra entraîne sa mort en 3 ans. Ce sont les piqûres sur les jeunes racines par les générations radicales de l'insecte qui précipitent la mort du pied.

L'insecte, originaire de l'est des États-Unis, a provoqué une grave crise du vignoble européen à partir de 1864, en raison de l'importation de ceps américains. On a observé une chute d'1/2 de la production et du 1/3 des surfaces cultivées, entraînant la ruine de nombreux exploitants. La viticulture française et européenne durent intégralement se reconstruire. Il a fallu plus de 30 ans pour surmonter cette catastrophe, en utilisant des porte-greffes issus de plants américains, naturellement résistants.

L'ERGOT DU SEIGLE

Claviceps purpurea Tul. est un champignon du groupe des *ascomycètes*, parasite du seigle.

Il contient des alcaloïdes en particulier l'acide lysergique dont est dérivé le LSD. Ces alcaloïdes sont responsables de l'ergotisme, appelé aussi mal des ardents ou feu de saint Antoine. Il a fait des ravages au Moyen-Age en provoquant des accès de folie (convulsions, hallucinations, tentatives de suicide) et des gangrènes.



Sclérotes sur un épi de seigle
© Arvalis



Poster extrait de l'exposition « La Santé des Plantes », Bibliothèque Universitaire Beaulieu (1er octobre-14 novembre 2020), site web : <https://bibliotheques.univ-rennes1.fr/> Auteurs André et Christiane Perrin, réalisation Alice Lemesle et Sébastien Ehrel.

Faire parler les charbons de bois issus de l'incendie de Notre-Dame



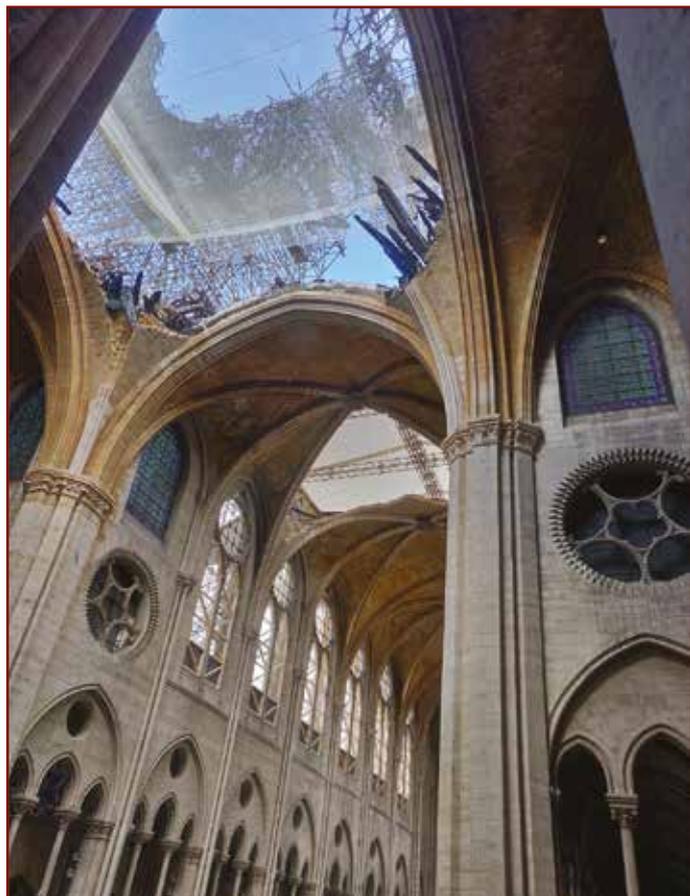
Damien Deldicque, médaille de Cristal du CNRS 2021, est assistant-ingénieur à l'École normale supérieure (ENS) de Paris. Il est responsable de la plateforme analytique du laboratoire de géologie de l'ENS-PSL. C'est un expert dans certains des couplages extrêmement originaux de techniques d'analyse (microscopies électroniques MET et MEB et microspectrométrie Raman) d'objets naturels ou anthropiques multiphasés.

Jean-Noël Rouzaud est directeur de recherche CNRS de classe exceptionnelle, retraité depuis 2016. Il a été lauréat de l'Académie des sciences en 2014. Depuis 40 ans, c'est un spécialiste de la carbonisation, de la graphitisation et des carbones

naturels et anthropiques.



Lorsque la cathédrale Notre-Dame de Paris a brûlé, le 15 avril 2019, la charpente en chêne d'origine (XIII^e siècle) a été presque entièrement détruite par les

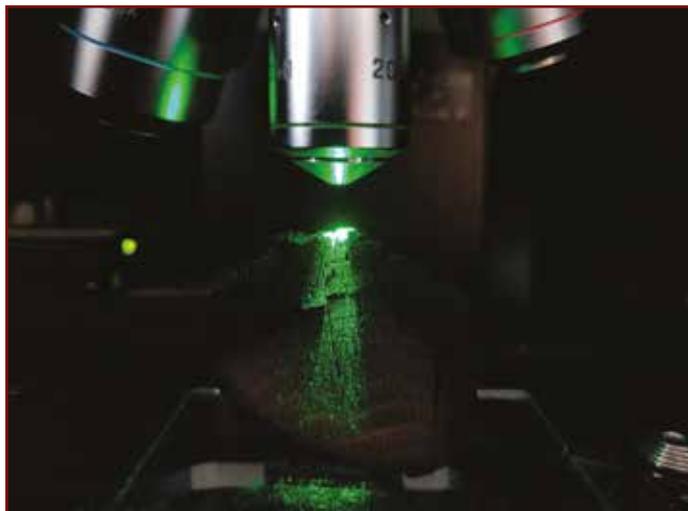


Ouverture dans la croisée du transept de Notre-Dame de Paris laissant apparaître des poutres carbonisées : ce seront les « thermocouples fossiles » de notre paléothermométrie Raman.

flammes. L'estimation des températures qui régnaient dans le bâtiment au plus fort de l'incendie est immédiatement apparue comme une question essentielle pour l'enquête judiciaire comme pour la maîtrise d'œuvre du chantier de reconstruction. *Il était donc primordial d'estimer de manière scientifique les températures maximales atteintes lors de l'incendie* et les confronter à celles (sans base scientifique) données par certains *media*. Les connaître, permettrait en effet de savoir si le plomb des toits avait été vaporisé ou non et d'évaluer les altérations thermomécaniques des pierres en calcaire de l'édifice. Le défi était de déterminer ces températures sur les restes d'un incendie éteint. Nous avons eu l'idée d'appliquer notre paléothermomètre Raman aux charbons de bois provenant de poutres de chêne incendiées de la charpente de Notre-Dame pour faire parler les charbons de bois collectés sur place après l'incendie.

PRINCIPE DE LA PALÉOTHERMOMÉTRIE RAMAN

Soumis à un traitement thermique croissant entre 400 et 1300°C, sous l'effet d'un feu ou dans un four de laboratoire, un précurseur organique (bois, os, etc.) donne des résidus solides : les carbonisats. Ils sont formés de feuillets d'hexagones d'atomes de carbone dont la taille augmente (de 0,5 à quelques nanomètres) de façon irréversible avec la température. Ces feuillets de carbone peuvent diffuser la lumière comme le font, par exemple, des poussières autour d'une source lumineuse. L'intensité de cette diffusion augmente avec le nombre et la taille des feuillets. Dans le cas de la microspectrométrie Raman, la source lumineuse est un laser et l'intensité de la bande de diffusion D augmente de façon monotone et irréversible avec la température.



Du charbon analysé par spectrométrie Raman: on y voit l'objectif du microscope et le faisceau laser vert frappant le charbon de bois (l'effet Raman est un phénomène de diffusion inélastique de ce faisceau laser par l'échantillon).

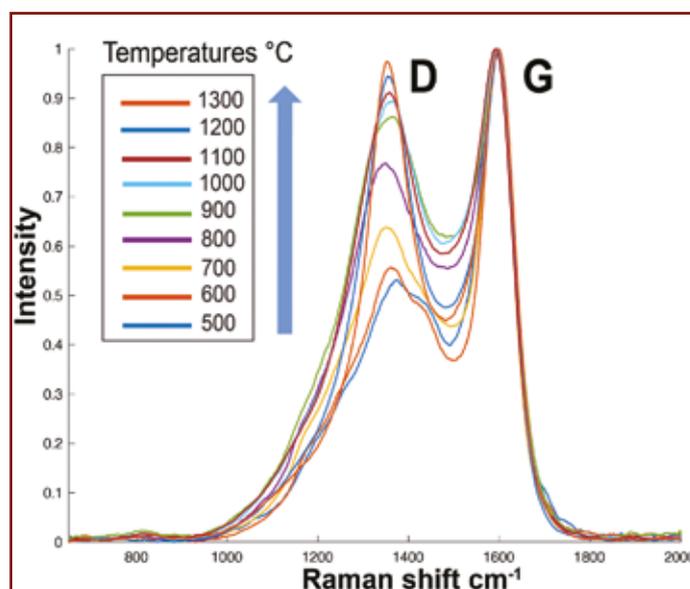
Nous avons ainsi pu proposer en 2016 un « thermomètre Raman » capable d'indiquer la température maximale atteinte et ce avec une précision de +/- 20°C à 1000°C. La croissance des feuilletés étant irréversible, on peut donc mesurer des températures sur des foyers éteints, d'où le terme de *paléothermomètre Raman*. Via leurs spectres Raman, les charbons de bois sont alors de véritables « *thermocouples fossiles* ». Après une validation avec des charbons de bois expérimentaux élaborés à des températures connues, nous avons testé le paléothermomètre avec succès sur des charbons de bois de pin provenant de foyers au sein de grottes préhistoriques paléolithiques de Chauvet et de Bruniquel (publications dans *Carbon volume 102* et dans *Nature volume 534* en 2016).

TRANSFORMER LES CHARBONS DE BOIS DE NOTRE-DAME EN « THERMOMÈTRES FOSSILES »

À l'invitation de Pascal Prunet, architecte en chef des Monuments historiques, nous avons prélevé sur place des échantillons de charbons de bois quelques semaines après l'extinction de l'incendie. Nous avons alors ressenti une grande émotion face à la destruction d'un chef d'œuvre de l'Humanité et une excitation scientifique de pouvoir peut-être « apporter notre pierre » à la compréhension de cet incendie et à la reconstruction de la cathédrale. Pour plus de pertinence, une nouvelle calibration a été effectuée en chauffant dans un four de laboratoire des morceaux de poutre de chêne restés intacts. Nous avons ensuite construit, à partir de carbonisats expérimentaux, une

courbe d'étalonnage spécifique aux charbons de bois de Notre-Dame où l'intensité de la diffusion de la bande D est donnée en fonction de la température de carbonisation. Le report sur cette courbe des intensités Raman mesurées sur les charbons de bois collectés permet de déterminer les températures atteintes par la charpente de chêne au cours de l'incendie.

La publication, le 5 juin 2020, des résultats dans les Comptes-rendus Géosciences de l'Académie des sciences* donne les premières mesures scientifiques des températures de carbonisation auxquelles a été soumise la charpente de Notre-Dame lors de l'incendie. À partir des charbons de bois prélevés à différents endroits stratégiques du monument, nous avons pu estimer les températures atteintes. *Les plus élevées (jusqu'à plus de 1200°C) ont été trouvées dans la croisée. La température*



Évolution des spectres Raman effectués sur les charbons en fonction de la température: c'est sur la croissance de la bande D avec la température de carbonisation qu'est basée la paléothermométrie.

maximale détectée à ce jour à cet endroit est 1212 +/- 79°C. Les températures sont supérieures à 900°C dans la nef et le transept. Ces mesures scientifiques sont cohérentes avec les températures maximales (1000-1100°C) mesurées *in-situ* au cours de feux de forêt. Ces températures infirment donc complètement certaines « élucubrations » qui imputaient à l'incendie des températures pouvant aller jusqu'à 2000°C.

Les températures maximales, mesurées grâce aux charbons de bois de Notre-Dame, sont toutes très inférieures à la température de vaporisation du plomb (1749°C) : il n'y a donc pas eu émission de vapeur de plomb *stricto*

sensu. En revanche, le plomb a une température de fusion de 330°C. Il a fondu et a même coulé sur les murs de la cathédrale avant de se resolidifier. Il faut cependant bien préciser que l'absence de vaporisation du plomb n'exclut absolument pas que de petites particules de plomb, nanométriques à micrométriques, aient pu polluer l'environnement sous forme d'aérosols. L'examen, par des équipes spécialisées, de ces « particules fines » (analyses élémentaires, minéralogiques, isotopiques) devraient assurément permettre de savoir si elles viennent, ou non, de la toiture et si elles sont responsables, au moins en partie, des pollutions au plomb observées dans le quartier.

En revanche, les températures mesurées (souvent de 900 à 1200°C) confortent une transformation du calcaire (CaCO₃) en chaux (CaO), laquelle se produit vers 900°C. Il est donc plus que probable qu'une transformation au moins partielle des blocs de calcaire de la cathédrale ait eu lieu. Certaines pierres ont été brûlées, au moins en surface. Même si la calcination est superficielle, elle peut suffire à fragiliser les joints entre blocs. Elle est donc potentiellement responsable d'une dégradation thermomécanique de la résistance mécanique de l'édifice. Là encore, il existe des équipes de scientifiques qui ont toutes les compétences pour établir un diagnostic fiable indispensable pour la reconstruction.

Ces premières données scientifiques de températures atteintes par la charpente de chêne lors de l'incendie de

Notre-Dame le 15 avril 2019 ont été utilisées début juillet 2020 par les architectes en charge des bâtiments de France chargés de la reconstruction de Notre Dame. Cette méthode unique sera aussi vraisemblablement utile pour évaluer les dégâts de l'incendie partiel de la cathédrale de Nantes le 18 juillet 2020.

Ces travaux et ces résultats originaux montrent, si besoin en était, *l'absolue nécessité d'une recherche publique dédiée à l'acquisition, dans la durée, de science de base indispensable pour établir des expertises indépendantes*. Cela implique des financements récurrents pour des recherches sans qu'elles soient focalisées sur des retombées économiques immédiates. La transformation du système de recherche français, mise en œuvre depuis 20 ans, est au contraire basée sur des appels à projets thématiquement et temporellement ponctuels. Des financements comme le crédit impôt-recherche (qui est en fait une niche fiscale) canalisent l'argent public sur des intérêts privés au détriment d'expertises indépendantes de tout groupe de pression et qui devraient donc être dévolues aux organismes publics de recherche.

RÉFÉRENCE

Temperatures reached by the roof structure of Notre-Dame de Paris in the fire of April 15th 2019 determined by Raman paleothermometry. Damien Deldicque & Jean-Noël Rouzaud, *Compte Rendu Géoscience*, Tome 352 (2020) no. 1, pp. 7-18.

Zoom sur la recherche en santé végétale au CNRS : l'IBMP de Strasbourg



Bernard Fritig, ingénieur chimiste (Ecole nationale supérieure de chimie, Strasbourg), est entré au CNRS en 1964. Il a soutenu sa thèse de doctorat d'Etat en 1968, sous la direction de Guy Ourisson et Léon Hirth, sur la biosynthèse de la scopolétine dans des cellules tumorales de tabac comportant le T-DNA d'*Agrobacterium tumefaciens*, et a reçu le Prix POURAT de l'Académie des sciences en 1970. Après un post doctorat (1968-1969) à l'université de Colombie Britannique (Canada), il a monté une équipe de recherche sur l'immunité innée au Virus de la mosaïque du tabac, d'abord au CRN de Cronenbourg (1970-1973), puis à l'IBMC (1973-1987), et enfin à l'IBMP (1987-2006) où il était responsable du département de Phytopathologie (1987-2000) puis directeur de l'institut (2000-2004). Il a été membre du Comité national du CNRS (section Biologie Moléculaire Végétale, 1987-1995), et président de Comités d'évaluation d'unités du CNRS et de l'INRA. Retraité, il est vice-Président de l'association des Amis de l'orgue Roethinger de Bischheim.

En 2017, l'Institut de biologie moléculaire des plantes (IBMP) à Strasbourg, le premier centre français du CNRS en sciences du végétal, a célébré ses 30 ans. On ne peut évoquer l'historique de l'IBMP sans le relier à celui de l'institut voisin du Campus universitaire de l'Esplanade : l'Institut de biologie moléculaire et cellulaire (IBMC), fondé en 1973 par le professeur Léon Hirth, éminent virologue, et Jean-Pierre Ebel, professeur de Biochimie. À la création de l'IBMP en 1987, aussi à l'initiative de Léon Hirth, 90% des effectifs (98 personnes) sont issus de l'IBMC et n'ont eu qu'à migrer dans le nouveau bâtiment IBMP situé à 50 mètres... pour y poursuivre leurs thèmes de recherche sur des modèles végétaux.

LE PRÉLUDE À L'IBMP

Ainsi, Léon Hirth (1916-1991) a joué un rôle fondamental dans la création de ces deux instituts importants du CNRS, et ceci grâce à son côté visionnaire exceptionnel, sa grande capacité d'anticipation, son dynamisme, et son habileté à convaincre les décideurs au CNRS et à l'université de Strasbourg d'investir dans les recherches concernant « la santé des plantes ». Il a débuté sa carrière scientifique, avec un doctorat d'État en 1958, déjà par un travail sur « La multiplication du virus de la Mosaïque du tabac », thème qui allait faire la renommée de l'IBMP. Suite à sa nomination de professeur de Microbiologie à l'université de Strasbourg en 1959, il monte un laboratoire d'étude des virus de plantes et de leurs interactions avec les cellules-hôtes. Au début, ses premiers collaborateurs étaient répartis entre un local de l'ancien Institut de botanique et des laboratoires au Centre de recherches nucléaires (CRN) de Cronenbourg (nouvelle-

ment créé par le CNRS), en attendant d'occuper le nouvel Institut de botanique en 1966. C'est au CRN qu'il développe un magnifique service de culture in vitro de cellules végétales et obtient la construction d'une serre ultra-moderne climatisée avec des compartiments étanches pour l'étude des virus et des interactions plantes-virus. Il comprend très vite qu'il faut appréhender la virologie végétale par la biologie moléculaire, avec notamment des approches de chimie organique et biochimie analytiques performantes. Il parvient en collaboration avec Guy Ourisson, professeur de chimie organique à Strasbourg et directeur de l'Institut de chimie (1969-1971), à convaincre le CNRS de créer une RCP (Recherche concertée sur programme) avec des moyens spécifiques



Professeur Léon Hirth
(Strasbourg, 1981).

en personnel technique, équipements et crédits, pour étudier la multiplication virale et les déviations métaboliques lors des interactions plantes-virus. La réalisation de ces recherches dans le CRN a favorisé la mise au point de techniques radiochromatographiques fonctionnelles très originales, et des marquages très courts des cellules en culture facilitant l'identification des intermédiaires clés dans les voies biosynthétiques des substances de défense. Il y a encore aujourd'hui à l'IBMP des chercheurs en métabolomique qui sont des « descendants » (55-60 ans après!) des pionniers qui ont œuvré dans cette RCP à Cronenbourg...

A peine installé dans le nouveau bâtiment de l'Institut de botanique en 1966, Léon Hirth se rapproche de Jean-Pierre Ebel, professeur à l'Institut de biochimie du Campus de l'Esplanade à Strasbourg, qui a déjà une renommée internationale dans les recherches sur la machinerie de biosynthèse des protéines chez des procaryotes, et qui cherche lui aussi à développer des approches de biologie moléculaire. Ensemble, ils ont œuvré pour la création d'une UPR (Unité propre de recherche, structure rare à l'époque) entièrement pilotée par le CNRS et donc bien dotée en crédits d'équipement et de fonctionnement. Étant proches tous les deux de la direction SDV du CNRS, ils ont négocié et obtenu, en 1967, la création de l'IBMC comportant leurs équipes ainsi qu'un groupe de Biophysique et un petit groupe de Génétique (156 personnes). Mais la construction du bâtiment pour accueillir l'IBMC prend du retard et n'est achevée qu'en 1973 - à cause d'une complication administrative entre l'université de Strasbourg et le CNRS : la cession de terrain. A sa tête, l'IBMC avait une Co-direction - de J.P. Ebel et L. Hirth - qui ont mis au point un système de concertation et d'alternance de direction « millimétré » très efficace. La réussite de cette opération scientifique peut être considérée comme remarquable, avec un institut toujours à la pointe technologique qui a permis des percées dans de nombreux domaines scientifiques, avec la formation et l'implication efficaces de jeunes chercheurs, une situation favorable qui a ensuite également bénéficié à l'IBMC dès sa création.

Les effectifs importants du laboratoire de Virologie (44 personnes) de L. Hirth dans l'IBMC lui ont permis d'aborder des études sur toute une série de phytovirus, tels que le Virus de la mosaïque du tabac (VMT), le Virus de la mosaïque jaune du navet, le Virus de la mosaïque de la luzerne, le Virus des anneaux noirs de la tomate, et un virus au nom amusant de virus du « Rabougrissement buissonneux » de la tomate. Ces virus comportent tous de l'ARN simple brin de polarité positive (comme l'actuel SRAS-COV-2 !). Dans le nouvel environnement de l'IBMC, les recherches évoluent vers l'utilisation des outils de la biologie moléculaire : séquençage des ARNs viraux, les approches immunologiques des interactions ARN-protéines, l'étude de l'organisation des gènes viraux, les stratégies de répllication, la fonction des différentes protéines virales.

Le soutien du CNRS pour la thématique des interactions plantes-virus se justifie par le fait que les maladies à virus sont nombreuses (on a déjà identifié de l'ordre de 1 000 phytovirus !) et qu'elles constituent une grande menace pour les cultures maraîchères et horticoles dans de nombreuses régions du monde, où elles réduisent la

croissance végétale et peuvent altérer l'aspect et donc la qualité commerciale des récoltes. D'où l'importance de comprendre les mécanismes d'infection, de multiplication et de propagation des virus, mais aussi les mécanismes de défense des plantes quand elles parviennent à résister. Dans le laboratoire de Virologie de l'IBMC, la résistance des plantes aux virus est étudiée notamment dans le cas de l'immunité innée face au VMT de tabacs portant le gène N de résistance. Celle-ci est caractérisée par une réaction de défense très forte au niveau du site d'infection du virus, avec la formation d'une lésion nécrotique entourée de cellules au métabolisme complètement perturbé et axé presque exclusivement sur la production de composés de défense à activité antimicrobienne, illustrée par une fluorescence en lumière UV due à des phénylpropanoïdes, dérivés du métabolisme phénolique (Fig. 1), ce qui conduit à en faire une zone d'immunité dans laquelle le virus ne se multiplie presque plus et reste confiné.



Fig. 1 : Symptômes en lumières visible (à gauche) et UV (à droite) de l'immunité innée au niveau d'un site d'infection du tabac par le VMT.

LA CRÉATION DE L'IBMC

L'opération IBMC était un succès incontesté et reconnu au plan national et international. Ses effectifs totaux ayant doublé depuis sa création, il s'est avéré dès le début des années 1980 qu'un agrandissement était inéluctable et justifié. C'est L. Hirth qui a mené les négociations avec le CNRS pour proposer la construction à proximité de l'IBMC d'un nouveau bâtiment dévolu à la recherche sur des modèles végétaux, ce qui a conduit à la création de l'IBMP, une UPR, gérée uniquement par le CNRS. Un nouveau bâtiment a été construit en 1987 pour accueillir l'IBMP, suivi par la construction en 1999 des serres de dernière génération sur la toiture (Fig. 2). La virologie végétale représentait 2/3 des effectifs de l'IBMP, le dernier tiers étant constitué par le groupe de Biochimie de



Fig. 2 : A gauche, le bâtiment principal de l'IBMP en 1999 avec ses serres extérieures et sur le toit.

Fig. 3 : A droite, vue de l'IBMP après l'extension du bâtiment terminée en 2015.

l'IBMC dirigé par le professeur Jacques-Henry Weil, nommé le premier Directeur de l'IBMP (1987-1999) avec le départ à la retraite de L. Hirth. En 1989, le CNRS a souhaité intégrer à l'IBMP 3 autres équipes de biologie végétale comportant du personnel CNRS et localisées à l'Institut de Botanique (distant de 800 m), mais par manque de place une seule a pu être accueillie physiquement dans le bâtiment IBMP. Cette situation sur 2 sites géographiques, qui a posé des problèmes d'intendance et d'animation scientifique, a duré 25 ans, jusqu'à l'extension du bâtiment IBMP achevée en 2015 (Fig. 3) quand l'institut devient alors une seule entité physique. Elle a néanmoins été une période enrichissante scientifiquement avec l'introduction de nouvelles compétences et a permis à l'IBMP de devenir le laboratoire de recherche fondamentale en biologie moléculaire végétale le plus important du CNRS (plus de 200 personnes) et un des plus importants en Europe.

En ce qui concerne les recherches sur la santé des plantes, les études de l'immunité innée au VMT chez le tabac ont été poursuivies, notamment sur le métabolisme des phénylpropanoïdes et sur les protéines dites PR (pour « *Pathogenesis-Related* ») synthétisées lors de l'expression de l'immunité, et découvertes déjà en 1970 par d'autres équipes. Les travaux originaux de l'IBMP ont montré que ces protéines ont une forte activité antimicrobienne, certaines sont des enzymes attaquant les parois des microbes pathogènes, d'autres destabilisent leurs systèmes membranaires, et d'autres sont des inhibiteurs d'enzymes microbiennes. Leur analyse a été menée en commun avec l'équipe de Jules Hoffman de l'IBMC (spécialiste des protéines de l'immunité innée chez les insectes, thématique qui lui a valu l'attribution du prix Nobel de médecine en 2011).

Les connaissances sur les phytovirus ont bien progressé également, d'une part sur les virus étudiés auparavant mais aussi sur de nouveaux virus à ARN à fort impact économique tels que le Virus de la rhizomanie de la betterave et le Virus du court noué de la vigne en collabo-

ration avec le Centre INRAE de Colmar. La transgénèse et l'acquisition d'équipements d'imagerie ont permis de suivre l'évolution des infections dans des cellules végétales vivantes, en précisant les sites de localisation ou de diffusion des différentes protéines virales. L'aménagement en 1999 sur le toit du bâtiment IBMP de nouvelles serres « biotechnologiques » à accès restreint (Fig. 2), avec des compartiments de niveau de sécurité dite P3 (risque de propagation), a permis de multiplier des virus recombinants et d'étudier soit les modifications de leur pouvoir pathogène soit l'effet protecteur des séquences introduites vis-à-vis de surinfections.

Entre 2000 et 2012, un certain nombre de chercheurs en virologie recrutés par L. Hirth sont partie à la retraite. Ils ont été remplacés par de jeunes chercheurs développant de nouvelles approches, par exemple des stratégies « d'extinction des gènes », un phénomène de régulation des gènes, fondamental et universel (mais dont la découverte a été faite chez les plantes !) et qui semble être le mécanisme le plus général et le plus efficace des résistances anti-virales. L'IBMP a dans cette période également progressé dans d'autres domaines tels que la biologie du développement, la biogénèse mitochondriale, et la « métabolomique » (dans ce dernier domaine par l'acquisition d'équipements de haute technologie). Aujourd'hui l'IBMP est rattaché à l'Institut des sciences biologiques (INSB) et dirigé par Laurence Drouard (DR CNRS). Ses recherches en santé des plantes s'étendent des interactions avec des pathogènes à la réponse végétale aux conditions adverses comme l'élévation de la température ou la sécheresse. Elles concernent six équipes actuelles dont quatre équipes de virologie et deux qui abordent la signalisation lors des réponses à des stress biotiques ou abiotiques et des polymères de surface des feuilles impliqués eux aussi dans la résistance antimicrobienne. Leurs résultats récents et projets sont décrits sur le site : www.ibmp.cnrs.fr

Pour terminer, une remarque amusante concernant le VMT. Léon Hirth, lorsqu'il a débuté sa thèse sur l'étude de la multiplication du VMT dans le Tabac, avait entendu la remarque suivante « Vous envisagez une thèse sur le VMT ? Mais tout a été fait et est connu sur ce virus ! ». Quelle erreur ! Et ce n'est pas fini ! Ce virus présente plus que jamais de l'intérêt en recherche et développement. En raison de sa capacité d'auto-assemblage et d'incorporation de revêtements métalliques (nickel, cobalt) dans sa capsid, le VMT est un candidat idéal pour être incorporé dans des électrodes de batteries : son ajout conduit à une augmentation de six fois de la capacité de la batterie ! A l'heure du tout électrique, l'intérêt pour le VMT ne faiblit pas...

Linné (1707-1778)

Marie-Françoise Lafon est médecin et documentaliste. Elle nous a fourni des éclairages érudits sur la poétesse Christine de Pizan, Lavoisier et les chimistes, et plus récemment sur l'Hôtel des Demoiselles de Verrières. Surtout, elle a inspiré le n°44 du Bulletin A3 (juin 2007) sur le tricentenaire de la naissance de Buffon, son savant préféré. C'est tout naturellement qu'elle revisite la carrière de Linné, son exact contemporain.



Il est impossible de parler des plantes sans évoquer le « Prince des botanistes », le célèbre naturaliste suédois : Carl von Linné, naît en 1707 à Råshult dans le Götaland (Suède). Il est d'abord appelé Carl Linnaeus (tilleul) par son père Nils, amoureux des arbres et des plantes. En 1709, celui-ci est nommé pas-

teur à Sternbrohult où il aménage un jardin dans lequel Carl passe son enfance. Il eut trois sœurs et un frère, Samuel, qui devait succéder à son père. Après des études au lycée de Växjö, son professeur de physique, un médecin, Johan Rothman, conseille à ses parents d'orienter Carl vers la médecine plutôt que vers la théologie. Après l'université de Lund, il rejoint en 1728 l'université d'Uppsala où il reste 7 ans, séjour interrompu par deux voyages, en Laponie en 1732 et en Balécarlie en 1734.

Ses premières études médicales mêlaient à la fois des croyances populaires et des théories mécanistes, mais ce qui l'attire particulièrement c'est l'histoire naturelle, et notamment la botanique. Grâce à ses maîtres, Olof Rudbeck, l'Ainé et le Jeune, et au jardinier botanique de l'université, il acquiert un véritable savoir dans le domaine. Il partage ses connaissances à Uppsala avec un autre étudiant en médecine, Petrus Artedi. Pour soutenir sa thèse de médecine il dut se rendre en Hollande avec Artedi mais celui-ci se noya dans un canal d'Amsterdam. Pendant son séjour en Hollande il publia une petite méthode de botanique : « *Fundamenta botanica* » (1736), puis « *Bibliotheca botanica* » (1736 également), « *Genera plantarum* » et « *methodus sexualis* » (1737) « *Hortus Cliffortianus* » (1737), « *Classes plantarum* » (1738), enfin l'œuvre posthume de son ami Artedi : « *Ichthyologia* » (1738). Il s'occupait en outre des Jardins de Hartecamp, domaine du banquier Georg Clifford.

Après quelques séjours en France et en Angleterre, Carl von Linné rentre définitivement en Suède. Il y exerce la médecine pendant trois ans et grâce à un ami obtient une chaire de médecine à l'université d'Uppsala en 1741 ; il l'échange ensuite pour une chaire de botanique.

En 1739 il s'était marié avec la fille d'un médecin des mines de Falun. Il aura un fils qui ne lui survivra que quelques années.

Sa carrière est marquée ensuite par de nombreuses publications : « *Flora suecica* » (1743), « *Fauna suecica* » (1746), « *Hortus uppsaliensis* » (1748), « *Philosophia botanica* » (1751), « *Species plantarum* » (1753). Il fonde et préside l'Académie royale des sciences de Suède.

Ses récits de voyages sont aussi très appréciés de ses compatriotes. Le premier à l'âge de 25 ans en Laponie, où en 5 mois il avait parcouru plus de deux mille kilomètres. Il en fit le récit en Hollande en 1737 avec « *Flora Laponica* ». En 1734 son voyage en Dalécarlie avait un but économique. Les suivants dans différentes régions de la Suède sont marqués par son amour de la nature et de son pays. Il fit son dernier voyage en 1749 en Scanie, province objet de sa préférence. Ses disciples par contre se rendirent fréquemment dans des pays lointains ; certains étudièrent la flore chinoise d'autres la flore japonaise. La Russie, l'Amérique du Nord et du Sud furent aussi l'objet de leurs recherches. Chacun envoyait à Linné des descriptions de plantes et d'animaux qu'il publiait. Il s'efforça aussi de classifier les maladies : « *Genera morborum* » (1763).

Sa renommée devint internationale. En 1761 il est anobli par le roi de Suède sous le nom de Carl von Linné. Mais en 1774 il est victime d'une attaque cérébrale. Il meurt en 1778 ayant accompli son grand projet de classification du règne végétal et animal. Après sa mort, sa veuve vendit ses collections à la « *Linnean Society* » de Londres. La Société Linnéenne fut fondée peu après à Paris.

SOURCES :

Carl von Linné, Henri Friedel, in La Grande Encyclopédie Larousse, 1974.

Carl von Linné, Gunnar Broberg, 2007, Institut suédois. L'herbier des philosophes, Jean-Marc Drouin, Le Seuil, 2008.

Les révolutions de la biologie et la condition humaine, Patrice Debré, 2020. Odile Jacob, 304 pages.



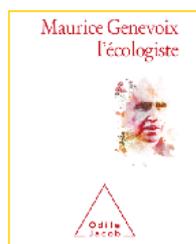
« Ne changeons pas les lois de la vie, cherchons à mieux les connaître », nous dit Patrice Debré dans la conclusion de l'ouvrage qu'il vient de publier, *Les révolutions de la biologie et la condition humaine*, vaste réflexion sur la place de la biologie dans notre société en pleine mutation. La mise en place de nouvelles technologies ouvrent des horizons qu'on aurait pu à peine imaginer il y a seulement quelques années.

Des rites cannibales aux mythes d'aujourd'hui, quoi de commun ? « Le *cyborg* a pris la place des mangeurs d'hommes d'alors » une façon un peu provocatrice, mais pourquoi pas, d'introduire le sujet. Des cellules souches pour reconstituer un organe à l'exploitation du génome qui permet aujourd'hui de traiter par thérapie génique des déficits héréditaires gravissimes, des cancers, des maladies au pronostic vital très lourd, de nouveaux espoirs surgissent. Patrice Debré donne de façon magistrale un aperçu lumineux de toutes ses approches pour les replacer dans un contexte sociétal, rappelant que « l'homme doit se modifier pour guérir et non pour se transformer ». Faire de la thérapie génique un projet de société, comme le propose P. Debré à la fin de la première partie de son ouvrage, dévoile sans ambiguïté l'objectif de l'auteur : nous montrer que « la biologie du futur est au cœur de l'humanisme à venir ». On ne peut pas rêver plus beau plaidoyer en faveur de la science dans une époque où les progrès de la science et son apport au bien-être humain sont souvent remis en question.

Patrice Debré est professeur d'immunologie à Sorbonne Université et membre titulaire de l'Académie nationale de médecine

Véronique Machelon

Maurice Genevoix l'écologiste, Jacques Tassin, 2020. Odile Jacob, 169 pages.



Après avoir publié en 2016 *A quoi pensent les plantes ?* et en 2018 *Penser comme un arbre*, ainsi que des travaux biographiques sur Maurice Genevoix, Jacques Tassin, chercheur au CIRAD, à travers son dernier ouvrage publié en 2020 *Maurice Genevoix l'écologiste*, a

cherché à montrer comment cet écrivain naturaliste, grand amoureux de la nature a pu être un précurseur de l'écologie à une époque où comptait plus le progrès technique abolissant les distances, faisant reculer la mort et la souffrance, donnant l'espérance de jours meilleurs. A l'image d'un saint François d'Assise et un peu comme M. Jourdain faisait de la prose sans le savoir. Dans un ample mouvement d'empathie, Maurice Genevoix s'identifiait aux arbres, aux fleurs, aux animaux qui l'entouraient au point de pouvoir reproduire le chant d'un rossignol. Un homme imprégné de joie de vivre aussi. Ayant vécu l'enfer des tranchées pendant la première guerre mondiale, gravement blessé, il en était sorti avec un appétit de vivre qui lui faisait savourer le monde qui l'entourait et toute journée qui s'offrait à lui comme un petit miracle. Fin observateur, il mettait un point d'honneur à nommer et à décrire avec une minutie scientifique chaque arbre, chaque plante, chaque animal qui peuplait le monde qui l'entourait. Cela suffit-il à faire de cet écrivain un peu oublié des jeunes générations, un écologiste avant l'heure ? Grand connaisseur de l'œuvre de Maurice Genevoix en même temps que militant écologique engagé, Jacques Tassin est particulièrement bien placé pour nous en convaincre, confrontant Maurice Genevoix aux différents courants écologiques qui se sont développés ces dernières années.

Véronique Machelon

La sardine et le diamant, de l'utilité de l'ordre et du désordre, Catherine Bréchnignac, 2020, Cherche Midi, 192 pages.



Ce titre que la poésie surréaliste ne renierait pas peut faire désordre. Or c'est celui choisi par Catherine Bréchnignac pour écrire sur l'ordre : « disposition intelligible des choses ». Quand les sardines migrent, elles forment des bancs de taille phénoménale, structurés mais dynamiques, chaque individu contribuant par des signaux à un ordre nécessaire à l'ensemble. Ce système est auto-organisé et malgré tout d'une grande flexibilité. Le diamant, c'est « l'ordre cristallin : la perfection ». Il n'est pas nécessaire de comprendre sa structure pour en éprouver la beauté. Avec l'étude de l'alignement parfait des atomes du cristal « La beauté de la raison se substitue à la beauté émotionnelle ». Cependant la notion de désordre productif apparaît déjà car des imperfections au moment de la cristallisation peuvent générer un ordre différent dont le cristal tire profit. L'ordre fractal, notion récente, se situe

entre l'ordre parfait et le désordre. L'autosimilarité d'objets naturels comme l'examen du givre sur une vitre quand il gèle dehors en est un exemple frappant et C. Bréchnignac nous le décrit avec toute sa complexité car le hasard est un composant important de l'ordre fractal. Le mouvement brownien a un caractère fractal à moins qu'il ne soit l'explication du phénomène. « Sans ordre la vie n'existerait pas ». Au cours des temps la raison s'est affirmée et a accompagnée l'histoire longue et chaotique des sciences. L'esprit scientifique est en soi une mise en ordre. Depuis la théorie de la matière de Platon jusqu'à l'ADN un ordre « quasi » universel des sciences s'est installé. A propos, la double hélice de l'ADN présente des mutations qui sont des désordres nécessaires, en tant que clefs de l'évolution. A côté « des ordres » naturels dont la science peut s'emparer, n'existe-t-il pas un autre type d'ordre propre à la condition humaine ? Quand l'homme pense à son ordre intrinsèque, est-il contraint à imiter la nature ou doit-il inventer un ordre qui lui soit propre ? Que signifie « l'ordre des choses » expression courante mais à choix multiples Elle peut en effet signifier qu'un ordre harmonieux ne peut procéder que de la nature, ou bien, l'intelligence humaine peut être créatrice d'un ordre qui lui soit propre. Avec le risque néanmoins de fracasser l'ordre naturel par un excès de désordre. Ce chapitre particulièrement passionnant aborde l'épistémologie, la philosophie ; les paragraphes s'intitulent : « l'ordre des choses » (déjà évoqué), « ordre et raison », « l'ordre naturel », « le désordre et le temps » « désordre fécond et ordre stérile ». Les réflexions s'alignent mais toujours en référence aux faits scientifiques. L'ordre semble-t-il est beau et nécessaire mais est-il le miroir inversé du désordre ? Laissons parler l'auteur dans une de ses conclusions : « l'homme sage met de l'ordre dans la société, il y introduit aussi une pincée de désordre afin de faire vivre ce qu'il a mis en ordre car la vie n'existerait pas sans un désordre fécond qui laisse des interstices pour y cultiver l'inédit ».

Cet essai (185 pages), très dense, s'appuie sur une bibliographie riche (118 titres mentionnés en bas de page). Très vite l'énigme du titre est levée car il porte en lui tout le développement très précis de l'ouvrage. L'exemple final : la pandémie du Covid-19 est loin d'être hors sujet, car entre ordre scientifique et désordre « numérique-politico-médiatique » *fake news*, l'ordre et le désordre interagissent largement.

Jacques Couderc

* *Physicienne de renommée internationale, Catherine Bréchnignac, membre de l'Académie des sciences dont elle a été secrétaire perpétuel (2^e division) de 2010 à 2016, a été directrice générale puis présidente du CNRS.*

Peut-on (encore) sauver la Corse (et les Corses) ?
par Fabrice Bonardi, 2020. L'Harmattan, 128 pages.



Peut-on (encore) sauver la Corse (et les Corses) ? fait suite à un essai par Fabrice Bonardi paru en 1989 et intitulé *Corse, la croisée des chemins*. La première partie de *Peut-on (encore) sauver la Corse (et les Corses) ?* évoque une île qui a de tout temps été « nourissante », subvenant aux besoins de 300 000 habitants au début du siècle dernier. Aujourd'hui ? Elle dispose d'une autonomie alimentaire d'à peine 3 jours. Une « descente aux enfers économiques » que l'auteur décline au long de faits historiques retenus à charge d'une politique nationale farouchement centralisatrice.

Au-delà du fait politique insulaire, l'auteur souligne que les confinements engendrés par le coronavirus ont mis en évidence la fragilité des économies bâties sur la mondialisation, et les aberrantes dérives d'un tel système. Il considère que, plutôt que de se fourvoyer dans d'interminables revendications institutionnelles, les insulaires doivent se mobiliser pour « refaire de la Corse un jardin ». Ce qui lui permet de souligner les nombreuses initiatives poursuivies en ce sens, qui font mentir d'injustes préjugés.

On apprend ainsi que l'on compte dans l'île pas moins de 117 *start-up*, dont certaines sont déjà des succès internationaux. Fabrice Bonardi évoque aussi quelques pistes d'un développement harmonieux, en rupture avec la folie spéculative qui a érigé 17000 résidences secondaires en 5 ans, pour l'essentiel auprès des rivages. Certaines propositions pourraient paraître utopiques. Mais l'auteur pense que seule l'utopie est dorénavant en mesure de sauver non seulement la Corse et les Corses, mais surtout l'humanité tout entière.

La démocratie a-t-elle besoin de la science ? Pierre Papon 2020. Éditions CNRS, 336 pages.



Voilà un ouvrage qui arrive à point nommé pour stimuler et structurer les réflexions qu'ont suscitées chez beaucoup de nos concitoyens les affirmations ou débats diffusés sur la quasi-totalité des médias lors de la crise sanitaire que nous vivons. En effet, pour la première fois à ma connaissance, le grand public a pu assister en

direct aux débats qui, toujours précèdent dans le monde de la recherche scientifique, l'établissement d'un consensus (ou de ce qui sera pour un temps au moins considéré comme une vérité). L'effet pervers de cette transparence a été la perte de crédibilité de la parole scientifique ; crédibilité déjà largement entamée du reste par les diverses « affaires » qui ont défrayé la chronique dans les deux ou trois décennies passées (nocivité des OGM, scandale du sang contaminé... etc.).

Pierre Papon rappelle dans les trois premiers chapitres de son ouvrage ce qu'est la démarche scientifique en quête d'une « vérité » et de ses limites. Le discours s'appuie sur des exemples récents ou plus anciens. La place des sciences sociales et humaines n'est pas oubliée tant dans les exemples que dans l'exposé du contexte dans lequel la recherche dans ce domaine est menée. Cela revêt une importance toute particulière car, de plus en plus, ce volet est présent dans des axes de recherche jadis exclusivement traités en termes de « sciences dures ». La longue saga des travaux de recherche dans le domaine de l'énergie décrite dans le livre est emblématique de cette intrication.

Ce sont les parties 2 et 3 qui sont le cœur de l'ouvrage et qui en justifient son titre.

Dans la deuxième partie, l'auteur, en s'appuyant sur des exemples convaincants pris dans les domaines scientifiques très divers (Astrophysique, Sciences de la vie, Sociologie ...), montre que le savoir issu de la recherche scientifique ne peut se découpler du contexte social et sociétal au sein duquel le travail a été mené. L'évolution des milieux scientifiques n'est pas très différente de l'évolution de la société ; ainsi, les questions d'intégrité et d'éthique ont émergé au cours des dernières années. L'auteur cite et commente les cas les plus emblématiques de cette déviance. Enfin le dernier volet de cette partie analyse les rapports parfois ambigus entre science et décision politique. Une clarification utile apportée par l'auteur concerne la distinction des rôles entre chercheur, expert et politique. Encore sur de nombreux exemples pris dans l'histoire des sciences et sur des questions d'actualité, l'auteur montre comment les sociétés se sont dotées d'outils d'aide à la décision politique ; même un lecteur supposé informé sera étonné par le nombre de structures (parfois redondantes – ce qui interroge -) dont l'État français s'est doté.

La dernière partie de l'ouvrage nous invite à réfléchir sur le rôle de la science dans la construction de notre vie démocratique. Si la science met à disposition du pouvoir des faits établis, et non pas des opinions, le rôle du poli-

tique est de mettre en œuvre ce qui est possible et/ou acceptable. Force est de constater que depuis quelques décennies, le progrès de la connaissance n'est pas forcément traduit dans l'opinion publique par une meilleure qualité de vie. L'ouvrage invite le lecteur à réfléchir sur les causes de ce divorce et des actions à entreprendre pour retrouver une confiance dans les retombées de la science. L'auteur suggère trois pistes qu'il appartient à tous d'explorer.

En ces temps où les questionnements sur la vie démocratique et sur la place de la science dans nos sociétés se font plus pressants, Pierre Papon nous fait un cadeau de valeur pour nous aider à prendre notre part dans le débat avec cet essai très dense de 320 pages assorties de près de deux cent références bibliographiques.

Yvan Segui

Pierre Papon est professeur honoraire à l'École supérieure de physique et chimie industrielle de Paris. Il a été directeur général du CNRS et PDG de l'Ifremer.

Les goûts et les couleurs du monde. Une histoire naturelle des tannins, de l'écologie à la santé, Marc-André Selosse 2019. Actes Sud, 352 page.



Cet ouvrage est né de la curiosité personnelle d'un biologiste (auteur du *Jamais seul*) qui nous promène, avec un enthousiasme contagieux, dans son récit sur un monde riche et étonnant, ponctué par les découverts inattendus sur bien des choses que les plantes nous réservent dans notre vie quotidienne. D'où viennent, pour en citer quelques exemples, les couleurs du feuillage d'automne et le parfum des fleurs, l'astringence du chocolat noir et la maturation des vins, la teinture du bois et les taches de maladies foliaires, la toxicité de certaines plantes et la vertu antioxydante d'autres ?

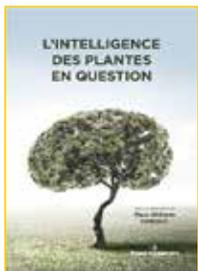
Bien que ces phénomènes naturels qui nous entourent ne semblent avoir rien en commun à première vue, l'exploration des huit chapitres de ce livre nous révèle l'omniprésence insoupçonnée des responsables universels - les tannins et leurs dérivés. Avec humour et aisance, Marc-André Selosse nous fait partager sa fascination pour ces substances qui se trouvent dans toutes les plantes, et aussi chez quelques champignons, et qui taquent nos sens et façonnent notre environnement. Appelé par l'auteur « le couteau suisse des plantes », les

tannins ont une myriade de fonctions utiles non seulement pour les plantes mais aussi pour nous.. Il nous explique les bases scientifiques de leur versatilité, et nous amène à découvrir leurs rôles divers aussi bien dans la machinerie cellulaire que dans les écosystèmes et dans nos assiettes dans les quatre coins du globe.

C'est un récit dense, mais accessible sans besoin de connaissances scientifiques approfondies. Sa lecture est facilitée par les conclusions qui closent chaque chapitre et allégée par les dessins amusants inspirés du texte. Marc-André Selosse ne peut pas nous laisser indifférents, tant il réveille nos sens et nous étonne sur la multitude d'activités et d'implications des tannins dans la nature et dans notre monde quotidien. A lire et, sans doute, à relire !

Vivienne Gianinazzi-Pearson

L'intelligence des plantes en question, sous la direction de Marc-Williams Debono, 2020. Éditions Hermann, 240 pages.



Il y a encore une vingtaine d'années, le sujet de la sensibilité des végétaux ne concernait qu'un cercle restreint de spécialistes. Dans cet ouvrage collectif, Marc-Williams Debono (directeur de la revue « *PLASTIR* » qui reprend le livre en ligne*) et neuf collègues, biologistes, écologues ou généticiens, traitent de l'intelligence des plantes, touchant un public plus large et avide de connaissances nouvelles, voire d'énigmes à résoudre. On connaissait déjà les *Droseraceae*, plus prosaïquement appelées « plantes carnivores », et tout étudiant en botanique a en mémoire l'exemple de *Mimosa pudica*, si bien nommé « sensitive ». Depuis, les neurosciences s'en sont mêlées, faisant de l'intelligence des plantes un sujet transdisciplinaire, et polémique !

Dès son prologue, Marc-Williams Debono apporte des éléments de réponses, résumés par l'expression intrigante : *La controverse d'Alpi*. En 2007, Amedeo Alpi était premier auteur d'une lettre cosignée par trente-six collègues, adressée à la revue « *Trends in Plant Science* », pour dénoncer « *l'idée provocatrice* » de la neurobiologie des plantes qui selon eux « n'apporte rien à notre

connaissance [des plantes] ». Anthony Trewavas, célèbre physiologiste écossais du végétal, a répondu en leur reprochant de s'en prendre seulement à une « *métaphore* ». Les promoteurs de cette école, notamment Stefano Mancuso, ont pourtant été inspirés par les écrits de naturalistes du XIX^e siècle, dont Charles Darwin et plus anciennement par Platon pour qui les végétaux font partie du *zôon*, cet ensemble unique des êtres animés, sans oublier le mystérieux monde chamanique des Amérindiens d'Amazonie.

Ce livre invite à redécouvrir notre planète après deux siècles d'*Anthropocène* - rebaptisé parfois *Capitalocène* - et à en partager une compréhension qui n'est ni anthropocentrée, ni zoocentrée. Il entend montrer les multiples rôles des végétaux dans les interactions existant dans la biosphère et avec les composantes du milieu proche et de l'environnement global. Si on reconnaît aux plantes des formes spécifiques d'intelligence (dont certaines restent à découvrir) qui ne seraient pas pilotées par un « cerveau » central, il serait réducteur et contraire à la notion de la *plasticité* des plantes, défendue ici, de limiter les études à leurs seules caractéristiques physiologiques. Dans cette perspective, le sujet est traité en trois parties et dix chapitres, en adoptant diverses approches des propriétés des plantes - biologiques, morphologiques, philosophiques, artistiques - et de leurs nouveaux pouvoirs, sans oublier la place croissante que les plantes prennent dans les futurs enjeux économiques, environnementaux, sociaux et politiques du monde.

Dans sa conception, cet ouvrage plaide pour des collaborations et des échanges accrus entre disciplines. Il revient plus que jamais aux biologistes de solliciter leurs collègues physiciens, chimistes, mathématiciens, artistes... En dépit - ou grâce à - d'inévitables redondances et citations entre les coauteurs, le lecteur pourra trouver plaisir à revisiter des concepts anciens, et à lire ou relire les écrits des auteurs antiques et des grands précurseurs des sciences de la vie et de la terre modernes, éclairé par les analyses des philosophes et des mathématiciens d'aujourd'hui. Enrichi par ces « pollinisations croisées », peut-être reprendra-t-il à son compte l'affirmation de Jacques Tassin dans le Chapitre I : « La plante fait mieux qu'être intelligente » ?

*https://issuu.com/collectifpourlacultureennessonne/docs/l_intelligence_des_plantes_en_quest_5d7106a78aa518

Francis Andreux

Qu'est-ce qu'une plante ? Essai sur la vie végétale, Florence Burgat, 2020. *Le Seuil*, collection *La Couleur des Idées*, 208 pages.



Florence Burgat est philosophe, directrice de recherche à l'INRAE. Sa réflexion philosophique porte sur la condition et la souffrance animale dans les sociétés industrielles, et plus globalement sur la définition de la notion de vivant. Dans son dernier ouvrage, elle prolonge ce questionnement au monde végétal. Les plantes rêvent, souffrent et meurent-elles comme les animaux ? Vivent-elles en réseau, ont-elles une forme de communication ou de sensibilité ? Plusieurs livres récents tentent à le démontrer comme, à titre d'exemple, le bestseller de Peter Wohlleben auteur de « La Vie secrète des arbres ». Florence Burgat revient sur l'étude empirique de la vie végétale telle que pratiquée par les botanistes dont les travaux s'efforcent de décrire, nommer et classer les espèces végétales. L'observation de leur morphologie et de leur système de reproduction a conduit petit à petit à une analogie où vie animale et végétale ne se distinguent plus. L'observation empirique de manifestations pouvant sembler communes aboutit à la confusion entre les deux espèces et la tentation de choisir le modèle animal pour comprendre le comportement des plantes. Florence Burgat rejette le courant actuel du tout « vivant » qui tend à cette indifférenciation. On ne protège pas les plantes pour les mêmes raisons que celles invoquées pour les animaux. Les végétaux ne souffrent pas et ne sont pas dotés de sentiments ou de sensibilité. Elle conclut par l'affirmation de la singularité de la vie végétale et évoque : « ...sa luxuriance, la fantaisie de ses motifs, son impassibilité et son silence... »

Dominique Simon

Voyage en université, Paul Vigny, 2020. *Ed. de l'Onde*, 227 pages.



Le lecteur est convié à découvrir la trajectoire suivie par l'université française depuis sa création au Moyen-âge, par le biais de visites de sites parisiens et d'échanges entre les participants. Sont ainsi explorés : la montée en puissance de l'institution jusqu'à la Renaissance, son lent déclin jusqu'à sa fermeture à la Révolution, le tournant impérial et l'engagement républicain en faveur des facultés, puis aujourd'hui, d'universités réellement pluridisciplinaires. Au fil des étapes, se dégage une vision d'ensemble de notre enseignement supérieur et du rôle qu'y joue l'université, aux côtés des grandes écoles et des organismes de recherche, ainsi que des raisons qui l'ont conduite à ce positionnement spécifique. Son rayonnement à l'international est également abordé. La dernière visite projette l'université au cœur du XXI^e siècle, soulignant le rôle moteur qu'elle devra jouer en liaison avec le monde de l'entreprise, dans une économie désormais basée sur la connaissance.

Professeur à l'université Pierre et Marie Curie, aujourd'hui Sorbonne Université, Paul Vigny a dirigé deux laboratoires CNRS aux interfaces des sciences de la matière et des sciences de la vie, à Paris puis à Orléans. Il a fondé le Studium, *Loire Valley Institute for Advanced Studies*, à vocation transdisciplinaire. Il se passionne pour le devenir de l'institution universitaire française, dont il a vécu un demi-siècle de mutations. Membre de l'A3, Paul Vigny a publié un premier livre « La Gloire ou la sérénité » sur sa carrière de scientifique, dont une recension est parue dans l'A3 Magazine n°69 (hiver 2016-17).

Propos recueillis par Paul Gille

LE BREXIT, ET APRES ?

Notre président d'honneur Edmond A. Lisle est à la fois français et anglais, de naissance et d'éducation, comme le rappelle entre autres son entretien dans l'A3 Magazine n°67 (hiver 2015-16). Il prend ici le relais de son ami, le regretté Maurice Niveau, disparu en début 2020, qui nous avait présenté avec autorité dans les n°69 (hiver 2016-17) puis 71 (hiver 2017-18), deux épisodes de ce lamentable feuilleton du Brexit qui est maintenant une triste réalité.

John Bercow était le « Speaker » (Modérateur) de la Chambre des Communes du Gouvernement britannique. Il en présidait les débats avec humour et impartialité, passant la parole alternativement aux députés de la majorité et de l'opposition.

Il a occupé cette fonction de 2009 à 2019.

Peu après son départ, relevé de toute obligation de réserve, il déclarait, le 6 novembre 2019 :

« Je ne suis plus le « Speaker » et je n'ai donc plus aucune raison de rester impartial. Mais si vous me demandez franchement si je pense que Brexit est bon pour notre position dans le monde, honnêtement je dirais non. **Je pense que Brexit est la pire erreur dans notre politique extérieure dans la période d'après-guerre** ».

Une première constatation s'impose :

La décision prise par le Royaume-Uni de quitter l'Union européenne résulte du référendum du 23 juin 2016, promis en janvier 2013 par le Premier Ministre conservateur de l'époque David Cameron.

Or un referendum propose une simple alternative - Oui ou Non - à une question infiniment complexe : annuler d'un trait de plume, des accords noués au cours des décennies précédentes entre le Royaume-Uni et ses voisins européens. Il ne suffit cependant pas d'annuler : encore faut-il remplacer ces accords par autre chose d'aussi détaillé et concret si l'on veut éviter de se retrouver dans les conditions commerciales définies par l'Organisation mondiale du commerce, qui impose des tarifs douaniers aux échanges internationaux.

Le referendum est un bon moyen de choisir dans un cas simple : entre deux candidats à un poste de Président par exemple. Les questions complexes ne peuvent être résolues que par des discussions approfondies assorties de compromis.

Neuf mois après le résultat, la Première Ministre de l'époque, Theresa May s'est efforcée de parvenir à un nouvel accord avec l'UE, puis convoqua des élections au Parlement afin de consolider sa majorité. Le contraire se passa : sa majorité fut réduite et dépendait désormais du bon vouloir des députés d'Irlande du Nord. Elle fut contrainte de démissionner le 24 juillet 2019.

Boris Johnson qui aspirait depuis longtemps à devenir Premier Ministre lui succéda, aidé en cela par les conseils machiavéliques de son « Eminence grise » Dominic Cummings. Il l'a largué depuis mais remplacé par un trio de femmes - son actuelle compagne (la 4^e) Carrie Symonds, son attachée de presse et sa conseillère politique.

C'est Boris Johnson qui gouverne désormais, ayant remporté une solide majorité parlementaire, remportant des sièges traditionnellement acquis aux Travailleurs - résultat dû à la direction trop gauchisante du parti sous Jeremy Corbyn. Le parti travailliste vient tout récemment de le destituer mettant en cause son anti-sémitisme avéré, et l'a remplacé par un éminent juriste, Sir Keir Starmer.

Mais le « Labour » est trop peu nombreux à la Chambre des Communes pour influencer sur le pouvoir. Seules, de nouvelles élections permettraient peut-être de sortir de l'impasse, mais on n'imagine pas Boris Johnson les convoquant.

Arrivé au pouvoir Boris Johnson semble incapable de définir une ligne de conduite claire. Il affronte une double menace.

Sur le front de la santé, une nouvelle variante de Covid qui serait plus virulente, s'abat sur le pays et engorge les hôpitaux, bien qu'une gigantesque campagne de vaccinations ait été engagée. Sur le front économique tout tourne au ralenti et le pays a déjà perdu plusieurs points de PIB.

Un nouvel accord sur le Brexit a été laborieusement négocié avec l'UE *in extremis*, juste avant le Jour de l'An date impérativement fixée par Boris Johnson. L'accord est long et détaillé .

Tourisme : le séjour des Britanniques dans l'UE est limité à 90 jours par période de 180 jours. Les Européens pourront entrer au RU avec une simple carte d'identité jusqu'en octobre 2021 mais auront ensuite besoin d'un passeport.

Travail : un permis de travail peut-être exigé en fonction de l'activité exercée et une maîtrise suffisante de l'anglais exigée.

Etudes : il est mis fin au programme *Erasmus*, ce qui prive les universités britanniques - très prisées sur le Continent - de dizaines de milliers de candidats et des frais d'inscription et d'études qu'ils apportent.

Droit de résidence : conditions d'installation plus difficiles pour les 1,3 millions de Britanniques résidant actuellement dans l'UE et les 4,2 millions de citoyens européens résidant au RU : Les droits de ces derniers sont protégés s'ils étaient installés avant le 31 décembre 2020.

Au total, tout le monde est perdant, mais le Royaume-Uni beaucoup plus que le Continent. Boris Johnson clamait que le Royaume-Uni voulait recouvrer sa souveraineté. C'était oublier que la souveraineté d'un pays est limitée par celle des autres, tout comme la liberté de chaque individu est limitée par celle des autres.

De surcroît, la souveraineté doit s'appuyer sur trois attributs pour s'exercer :

- un espace territorial étendu ;
- une démographie nombreuse ;
- des forces de défense importantes.

A l'échelle mondiale, deux pays remplissent ces conditions : les Etats-Unis et la Chine.

L'Union Européenne, même sans le Royaume-Uni, remplit les deux premières. Le Royaume-Uni isolé, aucune. S'agissant de la défense, l'Union européenne, Royaume-Uni compris, est alliée aux Etats-Unis au sein du Pacte Atlantique dans le cadre de l'Otan. Les Etats-Unis reprochent à juste titre à leurs alliés européens de ne pas payer leur juste part de ces frais. De surcroît, l'Otan est fragilisé par le comportement erratique de l'un de ses membres, la Turquie qui tend à s'allier à la Russie, adversaire potentiel de l'Otan. L'Otan n'en demeure pas moins une force de défense significative.

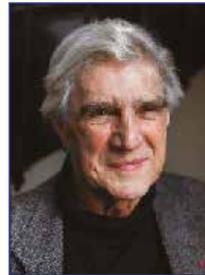
Plane enfin la menace d'un nouveau référendum sur l'indépendance de l'Ecosse qui avait très majoritairement voté pour le maintien dans l'UE. Ce référendum pourrait donner à l'Ecosse son indépendance.

De leur côté, l'Irlande du Nord - qui avait aussi voté pour rester dans l'UE - et la République d'Irlande souhaitent resserrer leurs liens. Va-t-on, à terme, vers une réunification des deux parties de l'Ile ?

Serait-ce alors l'éclatement du Royaume-Uni, ultime conséquence du référendum sur le Brexit ?

Edmond A. Lisle
8 janvier 2021

JEAN MALAURIE, ARPENTEUR DES DÉSERTS FROIDS ET DE L'ÂME HUMAINE



*Jean Malaurie, grand-croix de l'Ordre du Mérite, est né en 1922 à Mayence. Il poursuit des études à l'Institut de géographie de Paris et participe par deux fois à des expéditions polaires en 1948 et 1949. Spécialisé en géomorphologie, notamment des éboulis, Jean Malaurie est envoyé par le CNRS dans le désert du Hoggar en Algérie mais en solitaire cette fois. Sa première mission au Groenland, à Thulé, s'effectue durant l'été 1950 et servira d'objet à sa thèse consacrée à la géomorphologie dans le nord-ouest du Groenland. En 1951, Jean Malaurie atteint pour la première fois le pôle Nord géomagnétique. En 1955, son ouvrage *Les Derniers rois de Thulé* marque la création de la collection *Terre Humaine* aux éditions Plon. Il devient par ailleurs directeur d'études à l'EHESS en 1957 et la même année il est élu à la première chaire de Géographie polaire à l'EHESS. En 1962, il obtient le titre de docteur d'État de géographie de la Faculté des lettres de la Sorbonne. Au cours de sa vie d'explorateur, Jean Malaurie a participé à plus de trente missions polaires au Groenland et en Sibérie afin de cartographier ces régions polaires et d'étudier dans leur globalité les populations locales. Dans ses travaux, il porte une grande importance à mettre en évidence la relation étroite qu'entretiennent les Inuits avec leur environnement et s'inquiète de leur avenir. Il est l'auteur entre autres de *L'Allée des baleines* (2003), *Terre Mère* (2008) et *Lettre à un Inuit de 2022* (2015).*

Géographe, explorateur, maître de l'ethnologie française et fondateur de la prestigieuse collection « Terre Humaine », Jean Malaurie vient d'être élevé, par décision du Président de la République, à la dignité de Grand-Croix dans l'Ordre national du Mérite (promotion du 1^{er} janvier 2021), récompensant une vie au service de la science. Energie créatrice au service d'un dessein humaniste, le professeur Jean Malaurie en savant inclassable, éclectique et visionnaire a sillonné les sentiers multiples et entrelacés de la Connaissance. À la confluence des savoirs, il mobilise une approche heuristique plurielle à la fois rationnelle, sensorielle et géo-poétique¹. Insufflé par l'esprit de Jean-Jacques Rousseau et habité par la philosophie naturelle des Inuit, ces « *écologistes nés* », il interroge l'ordre intime qui structure la matière en écosystèmes.

Directeur de recherche émérite au CNRS et à l'EHESS, il effectue, sous l'égide du CNRS en 1950-1951, la première mission géographique et ethnographique française dans le Nord du Groenland, chez les Inughuit (Esquimaux polaires) de Thulé. Dans ce cadre, le 29 mai 1951,

il est le premier Européen à atteindre, en traîneau à chiens, le Pôle géomagnétique Nord (78° 29' N, 68° 54' W). Pendant son hivernage, « l'Homme qui parle avec les pierres » (ainsi le surnomment ses compagnons inuit) s'initie à leur conception animiste de la Nature : réseau de signes, celle-ci reflète les harmonies secrètes du Cosmos. Attentif à la parole du silence, Jean Malaurie traque l'énergie de la matière et les bruissements du sens. Ainsi passe-t-il de l'étude de la pierre (*ujaraq*) à l'étude de l'homme (*Inuk*), de l'intelligence de l'âme à l'intelligence du Cosmos. Au fil du temps, il restitue la connaissance acquise au travers d'une pluralité de registres : la transcription cartographique de l'espace, le langage visuel de la photographie et du documentaire, une prose puissante et évocatrice, la force dramaturgique des pastels qui matérialisent la plénitude de l'instant contemplatif.

« *Ce qui est visible n'est que le reflet de ce qui est invisible* », rappelle Rabbi Abba.

Comment traduire par quelques taches de couleur la théâtralité de nuages fuyant sur l'horizon, le vertige de toucher parfois aux origines de l'univers ? Dans l'ouvrage *Crépuscules arctiques du Groenland à la Sibérie jusqu'en Tchoukotka*², quarante pastels d'une beauté épurée illustrent un voir intérieur qui s'est enrichi d'une dimension chamanique. Le noir des nuits polaires n'y est pas sépulcral : il laisse entrevoir un ailleurs de renaissance : « *on y discerne un espace sombre et en désordre, explique-t-il, où se confondent diverses couleurs, explique-t-il, une bande blanche aussi, qui s'y superpose, comme une ouverture, un au-delà...* ». À l'aube de son centenaire, Malaurie, indéfectible défenseur des « *minorités minorées* » et authentique « *mémoire esquimaude* », incarne une philosophie de l'engagement qu'il place au service d'un dessein humaniste et écologique. Violée par un développement chaotique qui en menace la biodiversité, Nuna, la Terre Mère, « *ne souffre que trop. Elle se vengera. Et déjà les signes sont annoncés* »³. Alors que le réchauffement climatique éclabousse les équilibres environnementaux, socio-économiques et politiques, les Peuples Premiers, écrit-il, « *sont en réserve [...] pour être nos éclaireurs et nous protéger de nos folies en rappelant les lois éternelles (de la Nature...)* ». Ainsi, l'ancien réfractaire qui s'était insurgé contre la barbarie nazie plaide avec véhémence pour que « *la conscience de tous devienne une conscience écologique* ».

NOTES

(1) On renvoie à Giulia Bogliolo Bruna, Jean Malaurie : Une énergie créatrice, Paris, Coll. « Lire et Comprendre », Armand Colin, 2012.

(2) Jean Malaurie, *Crépuscules arctiques du Groenland à la Sibérie jusqu'en Tchoukotka*, Paris/Madrid, El Vivo, 2020.

(3) Jean Malaurie, *Terre Mère*, Paris, CNRS Éditions, 2008, p.13.

Giulia Bogliolo Bruna, A3 IdF, ethno-historienne, membre du Centre d'études arctiques (CNRS-EHESS). 21 janvier 2021

LE CONCOURS DE LA NOUVELLE GEORGE SAND

Le Concours de la nouvelle George Sand de Déols en Berry est un concours de nouvelles littéraires, écrites par des femmes, en langue française. À l'origine du concours en 2004, l'initiative de Fabrice Bonardi rencontre le soutien de Dominique Simon, présidente du jury et créatrice du Prix du premier roman de femme. Enraciné dans le Berry auquel George Sand (1804-1876) était indéfectiblement attachée, le concours est un hommage à l'écrivain, à son combat humaniste en faveur des femmes, et aux valeurs que la langue française doit continuer de porter. Paul Gille a rejoint le jury en 2020, 3 membres de notre association participent à cette manifestation. Remarquons que le précédent A3-Magazine associait George Sand et le CNRS à propos de l'Hôtel des demoiselles de Verrières, rue d'Auteuil.

La dernière édition du concours a retenu 8 nouvelles sur 647 textes en provenance de 22 pays. Le concours de **La nouvelle George Sand** se classe au premier rang des concours d'écriture. En 2021 le thème retenu est « Grain de Sable ».

Les lauréates 2020 autour du thème « Le jour venait de se lever » étaient Mathilde Faure, *La nouvelle George Sand* (Prix Lenzi) grâce à *L'art de la fugue* (nouvelle en provenance du Burundi) ; Caroline Torbey pour *Refuge* (Prix CBS Conseil - nouvelle en provenance du Liban). Chaque année, entre 6 et 8 nouvelles distinguées par le jury sont publiées en recueil aux éditions L'Harmattan.

Dominique Simon

PASSION DE LA POÉSIE, PASSION DES MILIEUX EXTRÊMES

Ce poème, écrit par une chercheuse géographe du CNRS, vient ajouter sa touche émotionnelle à la conférence tenue par Jacques Moreau le 22 octobre 2020 à Amopa. Je n'étais pas aussi fascinée qu'aujourd'hui par l'Arctique lorsque j'ai pu réaliser mon rêve d'Afrique, au Cameroun d'abord à l'occasion de ma maîtrise, en Côte d'Ivoire, au Togo et au Burkina Faso ensuite, comme membre du Laboratoire de

sociologie et géographie africaines (LA94), qui devint plus tard, par le jeu des intégrations, le Centre d'études africaines (CEA). De la forêt ivoirienne au Sahel burkinabè, en passant par les savanes togolaises, mes travaux ont toujours été sous-tendus par la problématique du développement rural...

C'est une fois à la retraite, que j'ai eu mon coup de foudre pour le Grand Nord et que je suis revenue à un mode d'expression que j'affectionne plus que tout autre, la poésie...



Iceberg en arche dans la baie de Disko. Photo d'A.-M. Pillet-Schwartz.

Kangerlussuaq, Ilulissat Sauvage Groenland

Vrai, le Groenland est gris, sauvagement gris.
L'avion tremble en plongeant sur la terre polaire,
Angoisse ou tempête, je ne sais... Plus un bruit,
Le ciel ressemble au couvercle d'un Baudelaire.

Au pays des Inuit, la beauté vous étreint...
À chacun ce trésor que d'aucuns ne partagent,
Cet éblouissement dont ils sont les gardiens,
Ce souffle inavoué, caché au fond des âges !

Décor inouï, où le désir d'éternité
Fait sens dans l'absolu d'une âpre solitude,
Où le vide éthéré tord bien des vérités
Et, le chaos sur pilotis, nos certitudes !

Depuis, comme un miroir, en rêve je revis
L'image des glaciers de tous mes paysages,
D'anonymes tableaux ancrés dans l'infini,
À l'unisson des tons dont ils ont l'apanage !

Non, les icebergs n'ont pas coulé mes ardeurs,
Au soleil de minuit, abris et rochers fondent
Et se disloquent dans la brume de mes peurs...
Je garde à jamais cet amour du bout du monde.

Anne-Marie Schwartz. Retour d'un séjour au Groenland.

Ô CORONA, POEMES D'UN CONFINÉ, LE POÈTE-ROI

Pour l'ensemble de son œuvre, **Chaunes (Jean-Patrick Connerade)** a reçu le Grand prix de Poésie (prix Victor Hugo) de la Société des Poètes Français. Il a également reçu le prix José-Maria de Heredia de l'Académie française et le prix Paul Verlaine de la Maison de poésie de Paris. Il a été lauréat du prix Mondial de l'humanisme en 2018 pour l'ensemble de son œuvre. Prix Gotseva Mislà en 2019.

Le Poète-roi

Le Poète est un roi qui s'ignore. Il ne sait pas d'où vient le pouvoir qui l'éveille aux aurores. Il entend sans comprendre. Il fait ce qui lui plaît mais ne sait pas pourquoi sa parole est sonore.

Il n'a qu'un bref instant pour la saisir. Il fait œuvre de petits riens. Il vit de métaphores. Il s'enivre de mots dont le sens le dévore et s'étourdit d'une syllabe. Il lâche un trait

vers le Ciel qu'il trahit en livrant ses secrets par des vers, sans savoir ce qu'ils ont d'indiscret. Les dieux, qu'il fréquentait déjà à sa naissance,

il écoutait leur langue et il la comprenait. N'apparaît dans son art aucune fulgurance mais seulement ce qu'en rêvant il apprenait.

Le Poète est aussi le va-nu-pieds des Lettres qui erre dans le siècle et n'y trouve aucun toit. Il est le marginal, le revenant, le spectre qui s'est trompé d'époque. Il fascine et déçoit.

Il ne joue pas le jeu. Il ne sait où se mettre. Il est le Jean-sans-terre inadapté aux lois, un intrus dont l'avis ne pèse d'aucun poids dans une société réglée au millimètre.

Mais il parle une langue audacieuse et rebelle qui donne aux temps leur style. Il signale souvent l'aube d'une ère inattendue. Il renouvelle

un sens perdu de la beauté. Il préfigure des jours meilleurs. Sa venue est de bon augure, comme l'est l'hirondelle apparue au printemps.

Ô corona, poèmes d'un confiné, Aux poètes français 2020.

Chaunes, à Aubaigues automne 2020

ROBERT CHABBAL

L'émotion à la disparition de Robert Chabbal est à la mesure du très grand serviteur de la recherche française qu'il a été. Pour évoquer sa carrière et l'influence qu'il a eue depuis les années 60, j'invite à consulter le communiqué de presse du ministère de la recherche :

<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid153961/disparition-de-robert-chabbal-physicien-et-organisateur-de-la-recherche-scientifique.html>

Pour ma part, je ne peux que le compléter par quelques souvenirs personnels.

J'ai connu Robert Chabbal en 1961 comme étudiant du troisième cycle de spectroscopie qu'il venait de créer. Ce premier contact m'a ébloui tant la clarté de ses cours vous donnait l'impression d'être vous-même plus intelligent. Mais il y transmettait aussi l'enthousiasme communicatif d'un jeune mais exceptionnel chercheur. Ses travaux sur l'interféromètre de Pérot-Fabry confocal ont d'ailleurs trouvé une application majeure très rapidement avec les premiers lasers qui n'auraient pas existé sans la maîtrise de cette technologie. Déménageant le laboratoire Aimé Cotton de Bellevue à Orsay il a à la fois conforté sa dynamique en spectroscopie (avec les travaux fondateurs de Pierre Connes sur la spectroscopie par transformée de Fourier) et lancé une nouvelle orientation en physique atomique. Il avait compris pour cela l'importance d'ancrer le développement de nouveaux thèmes sur des collaborations internationales au plus haut niveau (je pense notamment au rôle joué par le séjour dans ce laboratoire du physicien anglais, mais travaillant aux États-Unis, Brian Judd). Ceci était encore très peu courant à l'époque.

Au CNRS, directeur de la physique en 1969, puis directeur général de 1976 à 1979, il est immédiatement apparu qu'il avait à cœur de faire dépasser à cet organisme le simple cadre de la science fondamentale à laquelle beaucoup souhaitaient le restreindre. C'est ainsi que tout en défendant inlassablement le caractère global de la recherche et l'unité du CNRS, il s'est investi dans le projet d'ouvrir cette recherche au monde de la société et de l'entreprise. Ce n'est pas sans de très sérieuses oppositions de la part d'une grande part d'une communauté scientifique plutôt conservatrice, qu'il a créé le nouveau département des sciences pour l'ingénieur (Le SPI) et qu'il a développé les clubs Crin, tout juste créés par Hubert Curien, où chercheurs et industriels apprenaient à se connaître. Il propose la création des PIR, Programmes interdisciplinaires de recherche et dirige même le Pirdes, pour le développement de l'énergie

solaire, qui s'appuiera notamment sur la centrale solaire d'Odeillo. Il crée également le Piren, pour l'environnement, en 1978. Tout cela alors que bien peu de personnes se préoccupaient de l'environnement ou croyaient à l'avenir de l'énergie solaire. Toutes ces actions se sont révélées très en avance sur ce que pensaient la plupart des acteurs de la recherche de cette époque. Plus tard, il sera aussi à l'origine des instituts Carnot.

Par la suite la liste des rapports remarquables de lucidité qu'il a rédigés, pour toutes les administrations nationales et internationales qu'il a dirigées ou conseillées, mais surtout la liste des actions concrètes et des réalisations qui les ont suivis, est tout à fait étonnante. Ayant participé aux travaux qui ont conduit à plusieurs de ces rapports j'en garde le souvenir de débats passionnants, toujours subtilement guidés par la logique implacable, le pouvoir de persuasion et la gentillesse de Robert Chabbal.

Enfin je voudrais rappeler une action moins connue qui a fait que Robert Chabbal a aussi laissé son empreinte sur le groupe industriel Saint-Gobain. Ce n'est pas tant parce que, comme il me le rappelait souvent avec un sourire, il avait été pour quelques heures président du groupe Saint-Gobain (comme représentant de l'État au conseil d'administration, il avait présidé ce conseil jusqu'à l'élection du Président), mais parce que Jean-Pierre Causse prenant la direction de la recherche du Groupe en 1974 et trouvant cette recherche très désorganisée, il avait demandé un rapport sur la question à Robert Chabbal. Celui-ci, avec l'aide de Laurence Paye-Jeanneney, a préconisé deux mesures radicales : recruter massivement un grand nombre de jeunes chercheurs et mettre en place un mécanisme de financement de la recherche très particulier, répondant aux spécificités du groupe. La première mesure a pu être en grande partie mise en œuvre et a fait sentir ses effets positifs pendant de nombreuses années. La seconde s'est révélée un puissant et très original mécanisme assurant non seulement le financement optimal de la recherche et du développement technologique, mais aussi une intense communication, indispensable au sein d'un groupe relativement diversifié et international. Cette structure, mise en place en 1975 s'est révélée si efficace qu'elle perdure aujourd'hui, à peine modifiée.

Robert Chabbal a été pour beaucoup d'entre nous une sorte de grand frère qui impulsait puis guidait des évolutions dont nous sentions confusément à quel point elles étaient indispensables pour amener la recherche française à son plus haut niveau et à sa juste place dans la société. Il l'a toujours fait avec le souci de l'efficacité

mais aussi avec celui de convaincre et de ne brusquer que lorsque cela devenait inévitable. Sa personnalité chaleureuse nous manquera encore longtemps.

Jean-Claude Lehmann

<https://www.a3cnrs.org/page/63915-carnet>

JACQUELINE BONNIFET

Jacqueline Bonnifet est décédée ce 19 novembre 2020. Le CNRS Rhône Auvergne et l'Association des anciens et amis du CNRS rendent hommage à cette femme, témoin mais aussi actrice de l'évolution de l'organisme, en particulier sur ce territoire.

Dès la fin des années 1960, la montée en puissance du CNRS le mène à créer des circonscriptions partout en France. A leur tête, des administrateurs délégués représentent le siège et fournissent aux laboratoires de recherche un appui de proximité. Dans un premier temps, sept administrateurs sont nommés fin 1972, dont Jacqueline Bonnifet à Lyon, alors secrétaire générale de l'Institut de recherches sur la catalyse. Elle a participé à déployer la présence de l'organisme en région, en jouant pleinement son rôle aussi bien auprès des directeurs de laboratoires qu'auprès de nos partenaires académiques et institutionnels.

Ses collaborateurs et collaboratrices ont tous et toutes des souvenirs forts de cette période : Jacqueline Bonnifet a marqué par sa prestance, ses choix et ses décisions.

Partie à la retraite dans les années 90, elle a accompagné la communauté scientifique et a participé à faire de la région un territoire scientifique de première importance en France. Grands laboratoires, équipements de pointe et structuration du paysage de la recherche : ce sont autant d'éléments qui ont construit la communauté scientifique au fil des années et que Jacqueline Bonnifet a accompagnés. Jusqu'au bout, elle est restée connectée au CNRS, n'hésitant pas à livrer son témoignage lorsqu'on la sollicitait. La délégation régionale Rhône Auvergne du CNRS compte maintenant 125 unités de recherche et de service, majoritairement en cotutelle avec les universités et les grandes écoles. Et ce dans toutes les disciplines.

En souvenir de l'apport de Jacqueline Bonnifet pour la communauté et la société, et en soutien à sa famille et ses proches, le CNRS et l'Association des Anciens et Amis du CNRS expriment leur plus profond respect et toute leur reconnaissance.

Liliane Gomet

<https://www.a3cnrs.org/page/63915-carnet>

JEAN-PIERRE LEGROS

Trésorier de notre association pour la région Occitanie-Ouest, Jean-Pierre Legros, nous a quittés le 24 octobre 2020 à l'âge de 77 ans. Membre de l'A3-CNRS depuis de nombreuses années, il nous apportait son concours au sein du bureau régional comme trésorier. Né à Poitiers, après avoir suivi à Paris les classes de préparation aux concours, il avait choisi de rejoindre l'École nationale supérieure de chimie de Toulouse. Diplômé en 1965, il s'orientait vers l'Enseignement supérieur et la recherche.

L'essentiel de sa carrière de physicochimiste et de spécialiste des études par diffraction de rayons X s'est déroulé au sein du Laboratoire de Chimie de Coordination, laboratoire propre du CNRS. Cette carrière intégra divers séjours à l'étranger, notamment à l'université d'Uppsala (Suède), puis à celle de Long Island à Brooklyn (Usa). Nous ne reviendrons pas sur le parcours universitaire, le sérieux, l'extrême exigence de ses travaux de recherche, son apport à la connaissance de structures cristallines, en particulier celles de supraconducteurs moléculaires, son rôle d'enseignant. Mais cet hommage ne saurait oublier les qualités humaines de Jean-Pierre Legros.

La dernière fois où nous l'avons vu, c'était en septembre 2020 au cours d'une réunion du bureau régional de l'A3-CNRS. Nous souhaitions mettre en place la reprise des activités, différées pendant le confinement dû à l'épidémie. Ce jour-là nous nous sommes dit au revoir, et nous aurions surtout dû lui dire merci. Merci c'est un peu court. Jean-Pierre était quelqu'un qui vous réconciliait avec la nature humaine. Parmi tant de commentaires approximatifs, on pouvait compter sur la mesure et la justesse de ses avis, on appréciait sa discrétion et la finesse de ses réflexions, son humour aussi qui apportait une légèreté singulière et le recul nécessaire. On savait avec quelle acuité il était attentif à chacun, notamment dans les moments difficiles, toujours souriant, toujours bienveillant, d'humeur égale, un homme pétri d'humanité qui trouvait le temps de concilier ses multiples obligations et son goût pour la musique, le jazz et la pratique du saxo... Le souvenir de tout ce que nous avons partagé avec Jean-Pierre continue à nous éclairer et à nous reconforter.

Liliane Gorrichon

GENEVIÈVE FLAD

C'est avec tristesse que nous avons appris le décès de Geneviève Flad survenu le 12 septembre 2020 à Boulogne-Billancourt à l'hôpital Ambroise-Paré, à l'âge de 82 ans. Geneviève fit sa carrière au CNRS en tant que chimiste, et elle était restée très liée à l'institution, fréquentant régulièrement le campus Michel-Ange en voisine où elle aimait retrouver collègues et amis. C'était aussi une fidèle de notre association à laquelle elle était très attachée. Très présente aux visites et conférences organisées par la représentation Ile-de-France, elle participait fréquemment aux voyages organisés par l'A3. Discrète et vive, l'esprit ouvert sur le monde, elle nous manque bien.

Véronique Machelon

ROGER ACHER

Roger Acher était jusqu'à récemment un auditeur assidu des conférences organisées par la Représentation IdF à l'amphi Marie Curie de Paris Michel-Ange Auteuil. Il ne manquait pas d'y prendre la parole et d'enrichir les discussions par ses commentaires et remarques. Et c'est avec une grande tristesse que nous avons appris son décès survenu le 15 juin 2020 dans sa quatre-vingt-dix-septième année. Ancien titulaire de la chaire de biochimie de l'université Paris VI, professeur émérite des universités, le professeur Roger Acher était un des derniers pionniers de la neuroendocrinologie française et s'était notamment illustré par des études remarquées de biochimie comparée. Né en 1923, il s'était engagé en 1943 dans les Forces françaises libres ; il entre dans Berchtesgaden avec sa batterie le 5 mai 1945 et a la fierté de défiler sur les Champs-Élysées sur le Neptune le 14 juillet 1945.

Véronique Machelon

JEAN-CLAUDE VATIN

C'est avec une grande tristesse que nous venons d'apprendre le décès de notre ami Jean-Claude Vatin survenu le 2 mars dernier. A son épouse, sa famille et ses proches, nous assurons l'expression de notre profonde sympathie. Directeur de recherche émérite au CNRS, politologue, spécialiste du monde arabe, Jean-Claude était un fidèle de l'A3 depuis de nombreuses années. Amateur de parcours lointains, il a participé à de nombreux voyages organisés par l'A3, agrémentant nos séjours de sa présence chaleureuse et de son humour exquis. Nul mieux que son ami Jean-Patrick Connerade (Chaunes pour les

poètes) n'a exprimé dans les quelques mots qui suivent, l'émotion que nous partageons.

Jean-Claude Vatin

Il aimait le tournoi contre un esprit habile
ou, pour se régaler des travers des humains,
l'anecdote au détail cocasse ou inutile
dont il faisait son miel. Il suivait un chemin

personnel, sans jamais se plaindre du destin.
Il s'était affranchi des conventions stériles.
On le disait Breton pour expliquer son style
élaboré ailleurs dans ses parcours lointains.

Il avait ramené, d'un Orient plus heureux
qu'aujourd'hui, son regard amusé sur les choses
et d'Oxford, un trésor de bons mots savoureux.

De sa vie compliquée on eût fait un roman,
mais il aurait trouvé un tel livre assommant,
car il était de ceux que l'orgueil indispose.

Chaunes

VICTOR SANCHEZ

Apprenant le décès d'un de ses fidèles, Victor Sanchez, et ses obsèques prévues le 24 mars, la région Occitanie-Ouest a souhaité partager son émotion avec tous ceux qui l'ont connu au niveau régional et national. Victor Sanchez était connu à Toulouse pour ses activités au sein du laboratoire de Génie chimique dont il fut l'un des directeurs. Avec ses collaborateurs ils mirent au point des procédés de séparation très performants à l'aide de membranes ou par voie électrophorétique. Ces recherches ont aussi fait l'objet d'une expérimentation en apesanteur après embarquement sur une navette spatiale. En 2001 il fut nommé directeur du département des Sciences pour l'ingénieur et devint également directeur scientifique du programme interdisciplinaire Energie. Nous soulignons l'intérêt qu'il portait aux relations des laboratoires avec les partenaires industriels dont il favorisa le développement. Directeur de recherches, il avait reçu la médaille d'Argent du CNRS. Il était également docteur *honoris causa* de l'université d'Oviedo en Espagne et chevalier dans l'Ordre national du Mérite. Nous regretterons sa ténacité, sa rigueur intellectuelle, sa vivacité et ses qualités humaines. Nous gardons le souvenir du grand scientifique et du collègue unanimement apprécié.

Liliane Gorrichon

La Fondation du CNRS, son but, ses moyens fondation-cnrs.org

« La plupart des grandes institutions de recherche sont dotées d'une fondation. Pour un organisme de la taille du CNRS, il semble incontournable d'avoir un volet de mécénat, industriel comme venant des particuliers » selon les propres termes de Michel Mortier, préfigurateur de la Fondation du CNRS dans une interview accordée à *News Tank* le 22 mai 2019. Antoine Petit, président-directeur général (P-DG) du

CNRS, a souhaité que cette fondation soit une contribution au financement du CNRS. Aujourd'hui et depuis de nombreuses années, le CNRS reçoit de l'ordre d'1 M€ par an de legs et de dons sans avoir de structure dédiée, et sans faire de démarches particulières. L'objectif de la Fondation sera de trouver de nouvelles ressources, et d'avoir des fonds dédiés sur des thématiques où la générosité du public peut être importante. Avoir une fondation permet en effet de mieux identifier les fonds qui relèvent du mécénat et d'en faire une gestion à part, et à la fois de mettre en place un dispositif de collecte, notamment en ligne, pour faciliter ces dons. C'est aussi un outil de gestion pour ceux qui ont envie d'avoir une fondation dédiée : la fondation est dite « abritante », ce qui signifie qu'elle peut abriter des fondations sans per-



sonnalité juridique, dites « sous égide » sur « des grandes thématiques de société, environnementales par exemple, qui peuvent susciter des donations importantes ». Les statuts de la fondation ont été déposés au Journal officiel des fondations en janvier 2019. La mise en place de sa gouvernance a été actée lors du premier conseil d'administration (CA) de la fondation, pendant l'été 2019. Le

conseil d'administration est composé de quatre membres du CNRS : le P-DG, le directeur général délégué à la science, et deux représentants du personnel membres du CA et du conseil scientifique du CNRS, désignés par le P-DG du CNRS. Au poste de directeur général de la fondation, Michel Mortier. Le lancement des premières démarches vers les mécènes pour faire connaître la fondation et ses valeurs a été approuvé lors du premier. A la suite de quoi il a fallu aller à la rencontre des entreprises, et notamment des grands partenaires, lancer les premières démarches vers les mécènes puis mettre en place une campagne de communication avant d'envisager le lancement de campagnes de levées de fonds.

Bienvenue aux nouveaux adhérents A3

M. Sylvain ALLANO	Monthéry/Ile-de-France	Mme Thérèse DUMIELLE	Ivry-sur-Seine/Ile-de-France
M. Pierre BAUER	Valencia/Espagne	Mme Élisabeth DURAN	Toulouse/Occitanie Ouest
Mme Éliane BERAUD	Marseille/Provence - Côte d'Azur	Mme Monique FOUASSIER	Gradignan/Aquitaine
Mme Jeanne BOLON	Paris/Ile-de-France	Mme Marie- Louise GIREL BRANDY	Chambéry
Mme Paule CASTAN	Castanet-Tolosan/Occitanie Ouest		Alpes-Dauphiné
M. Georges CHAPOUTHIER	Paris/Ile-de-France	M. Pierre HALAIS	Chambray-lès-Tours/ Centre-Val de Loire
Mme Béatrice COCHINI	Paris/Ile-de-France		
Mme Dominique COMMELIN	Puylobier	Mme Sylviane JULIEN	Escalquens/occitanie Ouest
	Provence - Côte d'Azur	M. Stephen KERRIDGE	Marseille/Provence - Côte d'Azur
M. Gilbert DE MURCIA	Strasbourg/Centre-Est	Mme Patricia LEFEUVRE	Fermanville/Normandie
M. Maurice DELAFOSSE	Fontenay-sous-Bois/Ile-de-France	Mme Colette LESTRADE	Mons/Occitanie Ouest
Mme Marie-Claude DOP	Castenau-le-Lez/Occitanie Ouest	Mme Catherine MARLOT	Toulouse/Occitanie Est

Bienvenue aux nouveaux adhérents A3

M. Christian MAZARS	Belberaud/Occitanie Ouest	Mme Annick PRIEUR	Villeurbanne/Rhône
M. Jean-Claude MEUNIER	Marseille/Provence - Côte d'Azur	Mme Monique ROGARD	Libourne/Aquitaine
Mme Gisèle MEUNIER LAPORTE	Gradignan/Aquitaine	M. Georges ROUX	Paris/Ile-de-France
M. Bertrand MINAULT	Troyes/Centre-Est	Mme Maya SIGOGNEAU	Sceaux/Ile-de-France
M. Youssef MONSEF	Bures-sur-Yvette/Ile-de-France	Mme Annie SOURIAU THEVENARD	Balma/Occitanie Ouest
Mme Noémie MOREAU	Veigné/Bretagne et Pays de la Loire	M. Pierre TABERLET	La Terrasse/Alpes-Dauphiné
Mme Marie-France PLE	Juvisy-sur-Orge/Ile-de-France	M. Daniel THOMAS	Acigné/Bretagne et Pays de la Loire
Mme Nadine PRADELS	Bretagne et Pays de la Loire	M. Gérard VAUCLAIR	Toulouse-Occitanie Ouest

Lauréats CNRS des bourses ERC 2020

European Research Council

Supporting top researchers from anywhere in the world

En 2020, le Conseil européen de la recherche (ERC) a financé des chercheurs et chercheuses en Europe à travers ses « ERC Consolidator grants », pour un montant total de 655 millions d'euros.

Ces bourses, qui soutiennent le meilleur de la recherche exploratoire dans trois grands domaines - sciences humaines et sociales, physique et ingénierie et sciences de la vie - récompensent des porteurs de projets en Europe ayant obtenu leurs doctorats 7 à 12 ans auparavant. Les bourses « consolidators » (jusqu'à 2,75 millions d'euros) se situent entre les bourses « starting » (jusqu'à 2 millions d'euros) - 2 à 7 ans après le doctorat - et « advanced » (jusqu'à 3,5 millions d'euros) qui visent les chercheurs confirmés. Elles sont attribuées une fois par an pour une durée de 5 ans à des scientifiques issus de tous les pays du monde, mais devant accomplir leurs travaux de recherche dans un pays européen ou associé.

Cette année, 37 % des bourses ont été accordées à des femmes chercheuses, la proportion la plus élevée depuis le début du programme Consolidator. Au total, 13 % des 2506 projets proposés ont été financés en 2020. Les lauréats réaliseront leurs projets dans des universités, des centres de recherche et des entreprises des 23 pays européens, notamment l'Allemagne (50 subventions), le Royaume-Uni (50), la France (34) et les Pays-Bas (29).

Les 12 lauréats CNRS :

- Project : BEE-MOVE *Mathieu LIHOREAU*, Centre de recherches sur la cognition animale (CRCA - UMR 5169) / INSB

- Project : ExELang *Alejandrina CRISTIA*, Laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistique (LSCP – UMR 8554) / INSB
- Project : LIPIDEV *Yvon JAILLAIS*, Reproduction et développement des plantes (RDP – UMR 5667) / INSB
- Project : ORIGINS *Pierre-Marc DELAUX*, Laboratoire de recherche en sciences végétales (LRSV – UMR 5546) / INSB
- Project : CONQUER *Marco SCHIRO*, Jeunes équipes de l'Institut de physique du Collège de France (JEIP - USR 3573) / INP
- Project : RIDING *Agnese SEMINARA*, Institut de physique de Nice (INPHYNI – UMR 7010) / INP
- Project : SuperProtected *Nicolas ROCH*, Institut Neel (UPR 2940) / INP
- Project : Mobidic *Damien DAVAL*, Laboratoire d'hydrologie et de géochimie de Strasbourg (LHyGeS – UMR 7517) / INSU
- Project : NEUCosmoS *Silvia GALLI*, Institut d'astrophysique de Paris (IAP – UMR 7095) / INSU
- Project : MoCoS *Matthew MORROW*, Institut de mathématiques de Jussieu Paris Rive Gauche (IMJ-PRG – UMR 7586) / INSMI
- Project : BioSCoPe *Baptiste SIRJEAN*, Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (LRGP – UMR 7274) / INSIS
- Project : MERMAID *Anastasia Tatiana THEODOROPOULOU*, Cultures et Environnements. Préhistoire, Antiquité, Moyen Âge (CEPAM – UMR 7264) / INEE

L'Association des Anciens et Amis du CNRS (A3)

Fondateurs

Les regrettés MM. Pierre Bauchet • Jean-Baptiste Donnet • Claude Fréjacques • Charles Gabriel et Pierre Jacquinet.

Conseil d'administration

Membre de droit : Antoine Petit, Président-directeur général du CNRS

Membres élus : Roger Azria, Françoise Balestie • Fabrice Bonardi • Mireille Bruschi • Daniel Charnay • Gérard Coutin • Laurent Degos • Alain Foucault • Elisabeth Giacobino • Vivienne Gianinazzi-Pearson • Liliane Gomet • Liliane Gorrichon • Dominique Grouselle • Évelyne Jautrou • Anne Jouve • Jean-Claude Lehmann • Denis Linglin • Véronique Machelon • Jean-Pierre Régnauld • Patrick Saubost • Gilles Sentise • Marie-Gabrielle Schweighofer • Dominique Simon • Abderrhamane Tadjeddine.

Invités : Edmond Lisle - Président d'honneur • Jean-Pierre Schwaab - Vérificateur aux comptes

Bureau

Présidente : Liliane Gorrichon

Vice-présidente : Elisabeth Giacobino

Vice-président adjoint : Jean-Claude Lehmann

Secrétaire général : Gilles Sentise

Secrétaire générale adjointe : Anne Jouve

Trésorière : Anne Jouve

Trésorier adjoint, Conseiller auprès de la présidence en matières financières et budgétaires : Gilles Sentise

Chargé(e)s d'activités

Administratrice de la base de données : Anne Jouve

Site internet A3 : www.a3cnrs.org, **webmestre** : Dominique Simon

Groupe Web : Daniel Charnay, Alain Foucault, Dominique Simon

Responsable informatique : Daniel Charnay

Relations avec l'industrie : Roger Azria

Voyages : Annick Périllat

Représentants régionaux

- Alpes Dauphiné : Christiane Bourguignon • Alsace : Jean-Pierre Schwaab • Aquitaine : André Calas • Bretagne et Pays de la Loire : André Perrin
- Centre - Poitiers : Serge Sapin • Centre Val de Loire : Paul Gille et Jean-Pierre Régnauld • Corse : Fabrice Bonardi
- Ile de France : Dominique Grouselle, Dominique Ballutaud, Solange Lassalle • Limousin - Auvergne : Gérard Montarou
- Normandie : Laurent Beauvais • Occitanie Est : Serge Rambal • Occitanie Ouest : Yvan Segui • Provence-Côte d'Azur : Mireille Bruschi
- Rhône : Bernard Ille et Liliane Gomet.

Membres d'honneur

- Guy Aubert • Geneviève Berger • Catherine Bréchnignac • Edouard Brézin • Claude Cohen-Tannoudji (médaille d'Or CNRS, prix Nobel)
- Yves Coppens • Jacques Ducuing • Cléopâtre El Guindy • Serge Feneuille • Albert Fert (médaille d'Or CNRS, prix Nobel)
- Andrew Hamilton (Vice-chancelier de l'université d'Oxford) • Henry de Lumle • Nicole Le Douarin (médaille d'Or CNRS)
- Jean-Marie Lehn (médaille d'Or CNRS, prix Nobel) • Bernard Meunier • Arnold Migus • Pierre Papon • Jean-Jacques Payan
- Jean Tirole (médaille d'Or CNRS, prix Nobel) • Charles Townes (prix Nobel).

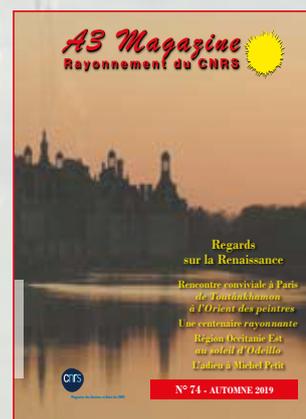
Rayonnement du CNRS a également eu parmi ses membres d'honneur les grands scientifiques suivants, aujourd'hui disparus :

- Maurice Allais (médaille d'Or CNRS, prix Nobel) • Baruj Benacerraf (prix Nobel) • Robert Chabbal
- Christiane Desroche-Noblecourt (médaille d'Or CNRS) • Jacques Friedel (médaille d'Or CNRS) • François Jacob (prix Nobel)
- François Kourilsky • Rudolph Mössbauer (prix Nobel) • Michel Petit • Norman Ramsey (prix Nobel).

DERNIÈRES PARUTIONS

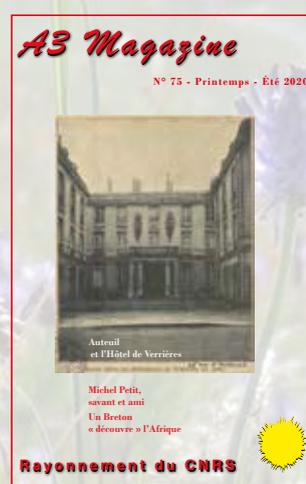
Magazine n° 74 - Automne 2019

- Dossier : Regards sur la Renaissance
- Rencontre conviviale à Paris
- *de Toutânkhamon à l'Orient des peintres*
- Une centenaire rayonnante
- Région Occitanie Est
- *au soleil d'Odeillo*
- L'adieu à Michel Petit



Magazine n° 75 - Printemps-Été 2020

- Dossier : Michel Petit, savant et ami
- Vie scientifique et culturelle
- *Un breton « découvre » l'Afrique*



Portail BibCNRS

Les adhérent(e)s de notre association A3 bénéficient d'un accès au portail des ressources documentaires de BibCNRS, opéré par Inist, qui met à la disposition des unités et des chercheurs du CNRS des millions de ressources électroniques d'articles, de revues et d'ouvrages, ainsi que des bases de données. Multidisciplinaire, BibCNRS propose dix espaces thématiques correspondant à chacun des dix instituts scientifiques du CNRS. Une nouvelle version du portail, avec une interface simplifiée, a été mise en place en 2020.

Si vous êtes adhérent(e) de notre association A3 et vous souhaitez accéder au portail de BibCNRS, veuillez prendre contact avec daniel.charnay@gmail.com afin que vous soient communiqués l'identifiant et le mot de passe du portail. Les informations de connexion sont réservées aux adhérents et ne devront pas être communiquées.

Association des Anciens et Amis du CNRS

Siège social : 3, rue Michel-Ange 75794 Paris cedex 16
Siège administratif : CNRS Meudon Bellevue - I, place Aristide-Briand - 92190 Meudon
Site web : <http://www.a3cnrs.org>

Pour toutes les questions relatives à la base de données et aux cotisations :
Anne Jouve, trésorière de l'A3 - anne.jouve75@gmail.com