



CONFÉRENCE DE PRESSE #SIA2019

LA VIE SECRÈTE DES PLANTES
ET DES ANIMAUX

 **INRA** | SIA2019
SCIENCE & IMPACT



1

LA COMMUNICATION CHIMIQUE
CHEZ LES INSECTES DANS UN
CONTEXTE D'AGROÉCOLOGIE.....5

2

L'ANIMAL,
PARTENAIRE DE L'ÉLEVEUR..... 10

3

LES PLANTES, SENSIBLES À LEUR
ENVIRONNEMENT ET CAPABLES
DE S'Y ADAPTER EN MOUVEMENTS.....15

4

AU CŒUR DES INTERACTIONS
ENTRE CHAMPIGNONS
ET ARBRES FORESTIERS.....24

LES INTERVENANTS

PHILIPPE MAUGUIN



Philippe Mauguin a été nommé PDG de l'Inra en conseil des ministres et a pris ses fonctions en juillet 2016. Ingénieur agronome, il a débuté sa carrière comme chercheur au Centre de sociologie de l'innovation de l'École des mines de Paris. Responsable du secteur agro-alimentaire au ministère de la recherche il a été conseiller de 1992 à 1993 auprès du ministre. De 1993 à 1997, Philippe Mauguin a été directeur de l'agriculture et des bioénergies à l'ADEME puis directeur du groupement d'intérêt scientifique Agriculture pour la Chimie et l'Énergie. Entre 1997 et 2002, il a été conseiller du Premier ministre pour l'agriculture, la forêt et l'alimentation. Il a ensuite occupé les fonctions de directeur de l'Institut national des appellations d'origine (INAO) et de directeur régional et interdépartemental de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt (DRIAAF) d'Île-de-France. Puis il a été nommé en 2009 directeur des pêches maritimes et de l'aquaculture au ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche jusqu'en 2012. Philippe Mauguin devient alors directeur de cabinet du Ministre de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, avant d'être nommé en juillet 2016, PDG de l'Inra. Son projet pour l'Inra est de permettre une mobilisation collective au service des grands défis de la planète et des questions posées pour l'agriculture et la forêt qui doivent s'adapter constamment aux nouveaux enjeux : nourrir le monde, accompagner la transition agroécologique, renforcer leur compétitivité en mobilisant au maximum l'innovation.

Il a ensuite occupé les fonctions de directeur de l'Institut national des appellations d'origine (INAO) et de directeur régional et interdépartemental de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt (DRIAAF) d'Île-de-France. Puis il a été nommé en 2009 directeur des pêches maritimes et de l'aquaculture au ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche jusqu'en 2012. Philippe Mauguin devient alors directeur de cabinet du Ministre de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, avant d'être nommé en juillet 2016, PDG de l'Inra. Son projet pour l'Inra est de permettre une mobilisation collective au service des grands défis de la planète et des questions posées pour l'agriculture et la forêt qui doivent s'adapter constamment aux nouveaux enjeux : nourrir le monde, accompagner la transition agroécologique, renforcer leur compétitivité en mobilisant au maximum l'innovation.

CHRISTIAN HUYGHE



Après une carrière de chercheur en génétique et amélioration des plantes, Christian Huyghe est aujourd'hui directeur scientifique adjoint « Agriculture » à l'Inra. Ingénieur agronome, il a dirigé l'Unité de génétique et d'amélioration des plantes fourragères de Lusignan, mis en place des programmes de recherche sur la génétique de la valeur alimentaire et de la production de semences de la luzerne, puis sur la valeur agronomique des prairies multi-spécifiques et leur évolution.

Il préside le comité scientifique du CTPS (Comité technique permanent de la sélection), le comité scientifique de cette instance, ainsi que le conseil d'administration du GEVES (Groupe d'Étude et de contrôle des Variétés Et des Semences). Il

préside également le COST (Conseil d'Orientation Scientifique et Technique) de l'ACTA (Association de Coordination Technique Agricole, à la tête du réseau des instituts techniques agricoles). Enfin, il assure la coordination de la commission indépendante d'évaluation du dispositif des CEPP (Certificats d'Économie des Produits Phytopharmaceutiques).

EMMANUELLE JACQUIN-JOLY



Ingénieure agronome, Emmanuelle Jacquin-Joly est directrice de recherche à l'Inra. Depuis 2014, elle dirige le département d'Écologie sensorielle de l'Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris - IEES Paris. Ses recherches portent sur l'écologie chimique des insectes dans un contexte de neurobiologie et de biocontrôle des ravageurs. Elle étudie les mécanismes moléculaires de l'olfaction et du goût chez les insectes, en se focalisant sur les récepteurs chimiosensoriels. Elle s'intéresse également à la contribution de la chimioréception dans l'adaptation des insectes à de nouveaux hôtes mais aussi à de nouveaux systèmes anthropiques. Elle s'attache également à comprendre l'évolution des récepteurs chimiosensoriels des insectes. Ses travaux utilisent des approches intégratives depuis la génétique jusqu'aux études comportementales, incluant des approches de génomique et de transcriptomique.

emmanuelle.joly@inra.fr / 01 30 83 32 12

XAVIER BOIVIN



Biologiste et éthologiste, Xavier Boivin est directeur de recherche à l'Inra où il anime l'équipe CARAIBE (Comportement Animal, Robustesse et Approche intégrée du Bien-Être) de l'unité mixte de recherche sur les herbivores, du centre Inra Auvergne-Rhône-Alpes. L'objectif de CARAIBE de contribuer au développement de pratiques qui promeuvent le bien-être et la santé des herbivores d'élevage, en assurant des performances techniques, une qualité de produits et une sécurité et un confort de travail pour l'éleveur. Les travaux de CARAIBE se focalisent sur la compréhension des besoins psychologiques, des perceptions (émotion et cognition) et des réponses comportementales des animaux à leur environnement d'élevage et d'abattage. Xavier Boivin s'intéresse tout particulièrement à la perception de l'homme par l'animal et aux mécanismes de construction de cette relation animal-homme.

xavier.boivin@inra.fr / 04 73 62 47 02

BRUNO MOULIA



Directeur de recherche à l'Inra, Bruno Moulia est un spécialiste de la biomécanique des plantes. Ses travaux visent à comprendre le contrôle du développement spatial et de la croissance des plantes, par des facteurs physiques environnementaux (vent, gravité). Un travail interdisciplinaire, combinant des approches de mécanique, d'écophysiologie et de biologie moléculaire, dans un dialogue entre expérimentation et modélisation, lui a permis de montrer la capacité de proprioception et de contrôle postural des plantes, les mécanismes de perception du vent et leur impact sur la croissance des plantes. Il dirige depuis 2017 l'unité mixte de recherche « Physique et physiologie intégratives de l'arbre en environnement fluctuant » du centre Inra Auvergne-Rhône-Alpes.

bruno.moulia@inra.fr / 04 43 76 14 23

CLAUDE MURAT



Spécialiste de la truffe, Claude Murat est ingénieur de recherche à l'Inra depuis 2008. Après un doctorat sur la diversité génétique des truffes obtenu en 2004 à l'Université de Nancy et de Turin, il a étudié pendant 4 ans la phylogénie et l'évolution des truffes à Turin. Il a intégré l'Inra et l'unité « Interactions Arbres-Microorganismes » à Nancy pour mener les programmes de recherche sur les truffes à l'Inra (ControlTruf, ClimaTruf, CulturTruf). Il a en charge la licence de savoir-faire Inra sur la production de plants mycorhizés ainsi que les relations entre l'Inra et la filière trufficole. En 2007, il est à l'origine de la création de la start-up DiNAMYCODE. Claude Murat fait également partie du comité de sélection de l'« Incubateur Lorrain », une pépinière de jeunes entreprises dont l'Inra est partenaire.

claudemurat@inra.fr - 03 83 39 41 27



1

LA COMMUNICATION CHIMIQUE CHEZ LES INSECTES DANS UN CONTEXTE D'AGROÉCOLOGIE

Chez les insectes, la communication chimique est vitale pour survivre et se reproduire. Sources de nourriture, congénères ou prédateurs... la perception de leur environnement mobilise fortement leurs sens chimiques : olfaction et goût. Ainsi, les insectes ravageurs déploient certains comportements étroitement liés à leurs capacités olfactives qu'il s'agisse de la reconnaissance d'un partenaire sexuel, du choix de la plante hôte ou encore des denrées stockées, mais aussi des sites de ponte.

Comprendre les comportements de ces insectes, ce qui les attire ou les éloigne, comment les signaux sont décodés, comment leur olfaction a évolué pour devenir si efficace et adaptée à leur écologie... depuis plus de 40 ans, les chercheurs de l'Inra étudient l'écologie chimique des insectes ravageurs des cultures et mettent au point des stratégies de biocontrôle, basées sur la perturbation de ces sens. De telles méthodes impliquent par exemple l'utilisation de substances naturelles volatiles (comme les phéromones) pour lutter contre ces insectes. La perturbation du cycle de reproduction passe par une altération du comportement.

- *SPODOPTERA LITTORALIS* :
- RAVAGEUR DE CULTURES ET MODÈLE D'ÉTUDE

Les lépidoptères représentent plus de 10 % des espèces vivantes décrites à ce jour. Parmi eux se cachent de redoutables ravageurs de cultures. C'est le cas de *Spodoptera littoralis* : un papillon de nuit de la famille des noctuelles. Ses chenilles ravagent les cultures et peuvent attaquer tous les organes de la plante. Dans son aire d'origine, l'Égypte, *S. littoralis* est l'un des plus dangereux ravageurs du cotonnier. Installé dans tout le Bassin méditerranéen, ce papillon attaque plus de 80 plantes différentes, dont des cultures industrielles et légumières (tomate, piment doux, cotonnier, maïs, pomme de terre...). Il est également fréquemment trouvé dans plusieurs pays d'Europe. En France, dont la Corse, il ne semble pas encore avoir d'habitat fixe mais est détecté tous les étés. En Italie, il provoque des dégâts aux productions horticoles et floricoles sous serres. *S. littoralis* est l'une des espèces les plus fréquemment interceptées sur les plantes ornementales importées et représente un réel danger pour les cultures sous serres du nord de l'Europe.



Facile à élever, *S. littoralis* constitue également une espèce biologique de choix. Son appareil sensoriel et son système nerveux sont relativement simples et accessibles, ses gènes impliqués dans l'olfaction sont bien connus et son comportement a été largement étudié et décrit.

COMMENT LES PAPILLONS MOBILISENT LEUR ODRAT POUR COMMUNIQUER AVEC LEUR ENVIRONNEMENT

Chez l'insecte, la perception de l'environnement odorant dépend d'un répertoire de récepteurs olfactifs peu étudié. Ces récepteurs olfactifs sont des protéines membranaires qui transforment les signaux odorants en signaux électriques dans les neurones olfactifs des antennes de l'insecte. Si les récepteurs olfactifs de nombreux insectes ont été identifiés, la plupart d'entre eux ne sont pas encore caractérisés fonctionnellement, c'est-à-dire qu'on ne sait pas quelle(s) odeur(s) chacun reconnaît.

Afin de mieux comprendre l'écologie de *S. littoralis* à travers la perception qu'il a de son environnement, des chercheurs de l'Inra, de l'UPMC et de l'Université suédoise des Sciences Agricoles ont analysé son répertoire de récepteurs. Pour un grand nombre de ces récepteurs, les odeurs qui les activent ont été identifiées. Plus ou moins spécialisés, ils sont sensibles à une diversité d'odeurs : des odeurs vertes rappelant la pelouse tondue, des odeurs florales ou encore des phéromones sexuelles. Ils sont particulièrement performants vis-à-vis des terpènes, des composés émis par les feuilles, susceptibles d'intéresser les chenilles herbivores, et les fleurs, à même d'attirer les adultes se nourrissant de nectar. *S. littoralis* se distingue ainsi d'autres insectes qui occupent des niches écologiques différentes, telle la mouche du vinaigre *Drosophila melanogaster* plutôt portée sur les odeurs de fruits pourris ou le moustique *Anopheles gambiae*, vecteur du paludisme et friand d'odeurs de mammifères.

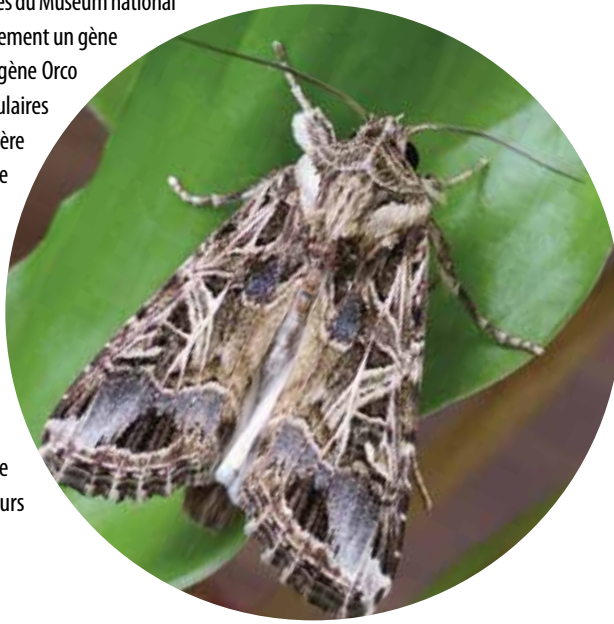
L'analyse de l'histoire évolutive des récepteurs de *S. littoralis* et d'autres espèces de papillons révèle l'existence de grandes familles fonctionnelles de récepteurs chez les papillons. Contrairement à l'idée admise que la séquence protéique d'un récepteur olfactif d'insecte ne permet pas de prédire sa fonction, les scientifiques ont mis en évidence une relation manifeste entre l'appartenance à une de ces familles et le type de composés odorants reconnus par un récepteur. Ainsi, les récepteurs des familles les plus anciennes (qui sont aussi les plus conservés au cours de l'évolution) sont sensibles à des composés à cycle aromatique très répandus dans le monde vivant, tel l'eugénol ou l'indole, tandis que les familles de récepteurs apparues plus récemment chez les papillons (et qui évoluent plus rapidement) sont spécifiques de phéromones ou de molécules, comme les terpènes ou les acétates à chaînes courtes, émises par les plantes. Ces résultats témoignent de l'adaptation du système olfactif des papillons à des niches écologiques nouvelles.

Ces travaux, publiés en juin 2017 dans *Nature Communications*, se posent non seulement comme une référence pour explorer, à l'échelle moléculaire, l'olfaction d'autres papillons mais jette aussi les bases pour comprendre comment un insecte ravageur herbivore utilise son répertoire de récepteurs pour sélectionner, parmi tant d'autres, une plante hôte. Par l'identification de récepteurs clés, il ouvre la voie à de nouveaux moyens de lutte contre les insectes ravageurs de cultures en lien avec l'olfaction.

INDUIRE LA PERTE D'ODORAT

Toujours chez *S. littoralis*, les chercheurs de l'Inra et leurs collègues du Museum national d'histoire naturelle ont mené une autre étude ciblant spécifiquement un gène bien connu pour son rôle dans la communication olfactive : le gène Orco (*odorant receptor co-receptor*). En adaptant les ciseaux moléculaires CRISPR-Cas9 au papillon, ils ont démontré qu'une mutation délétère dans ce gène entraîne la perte de l'odorat des insectes pour une série de composés odorants issus de plantes ainsi que la phéromone sexuelle des femelles.

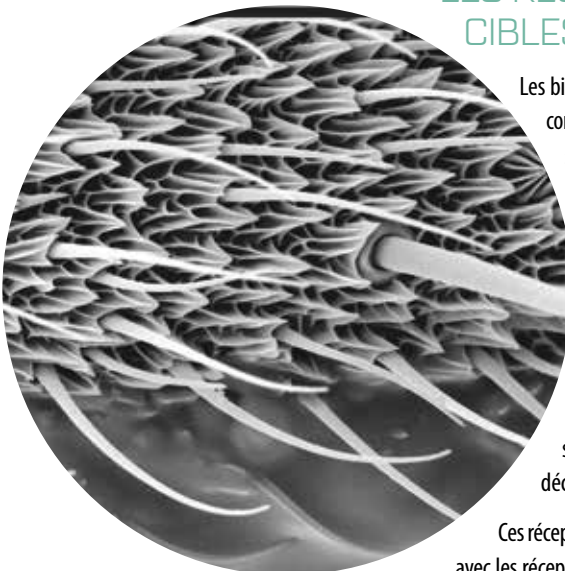
Tout indiquait que, chez ce papillon, les récepteurs olfactifs à ces odeurs fonctionnaient en interagissant avec le co-récepteur Orco, comme cela avait été par ailleurs montré chez la mouche modèle *Drosophila melanogaster*. À l'inverse, ces mêmes individus continuaient de percevoir l'odeur de l'acide propionique, émis lors de la décomposition des végétaux, montrant ainsi que la détection de tels produits est assurée par d'autres récepteurs indépendants de toute interaction avec le co-récepteur Orco.



RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

- › de Fouchier A., Walker W.B., Montagné N., Steiner C., Binyameen M., Schlyter F., Chertemps T., Maria A., François M.C., Monsempe C., Anderson P., Hansson B.S., Larsson M. C., Jacquin-Joly E. (2017) Functional evolution of Lepidoptera olfactory receptors revealed by deorphanization of a moth repertoire. *Nature Communications*. 8:15709 | DOI: 10.1038/NCOMMS15709
- › Koutroumpa F.A., Monsempe C., François M.C., de Cian A., Royer C., Concordet J.P., Jacquin-Joly E. (2016) Heritable genome editing with CRISPR/Cas9 induces anosmia in a crop pest moth. *Sci. Reports* 6:29620 | DOI: 10.1038/srep29620

LES RÉCEPTEURS OLFACTIFS : DE NOUVELLES CIBLES EN PROTECTION DES CULTURES



Les bio-olfacticides se définissent comme des molécules mimétiques d'odorants actifs sur le comportement des insectes en interférant au niveau des récepteurs olfactifs eux-mêmes. Il peut s'agir ainsi de « bloquants » olfactifs, d'antagonistes du récepteur (l'insecte est indifférent à l'odeur qui le stimule habituellement) ou de « super agonistes » (le récepteur « super » stimulé entraîne une réponse comportementale amplifiée de l'insecte).

Lancé en janvier 2017 pour une durée de 5 ans, le projet Demeter « Bio-olfacticides : produire plus avec moins d'insecticides » vise à identifier - chez *S. littoralis* - quelles molécules odorantes sont reconnues par quels récepteurs olfactifs. Puis, des approches de modélisation ligand/récepteur d'intérêt seront ensuite développées. Elles permettront d'identifier des bio-olfacticides potentiels, dont les effets sur les récepteurs olfactifs et sur le comportement de l'insecte seront testés en laboratoire. Les premiers récepteurs clés découverts sont brevetés ou en cours de brevetage.

Ces récepteurs olfactifs sont en effet des cibles particulièrement pertinentes : sans identité aucune avec les récepteurs de vertébrés, et extrêmement divergents entre espèces d'insectes, ils permettent une action ciblée. L'utilisation de telles molécules bio-olfacticides permettra de préserver la biodiversité en général et les insectes utiles en particulier. Dans le domaine de la santé humaine, et en particulier dans la lutte contre les moustiques vecteurs de maladie, cette approche « bio-olfacticides » est en pleine émergence aux États-Unis avec des résultats extrêmement probants et des molécules déjà brevetées.

LES CHENILLES AUSSI ONT DU FLAIR

Chez les papillons ravageurs, les dégâts sont causés par les chenilles qui se nourrissent des feuilles ou d'autres tissus végétaux. Jusqu'à présent, le comportement des larves a peu été étudié et on considère souvent que les chenilles se nourrissent sur les plantes où les femelles ont laissé leurs œufs. Pourtant, des travaux ont révélé que les chenilles peuvent s'orienter grâce aux odeurs et sont capables de changer de plantes hôtes.



En 2012, les chercheurs ont étudié les déplacements des larves de *Spodoptera littoralis*, en réponse à des phéromones sexuelles. Contre toute attente, ils ont montré que la chenille du papillon, qu'elle devienne ensuite papillon mâle ou femelle, est attirée par la phéromone sexuelle de son espèce, utilisée par les adultes pour se retrouver. Ces travaux ont également mis en évidence que les chenilles sont préférentiellement attirées par une source de nourriture quand celle-ci contient des phéromones sexuelles. Les chercheurs ont formulé l'hypothèse que la présence de phéromone favoriserait la quête de nourriture des descendants après l'éclosion. Ce signal pourrait en effet être présent dans les sites propices à l'alimentation des chenilles, sur les plantes suite à la reproduction des adultes ou déposé par la femelle sur les feuilles ou les œufs lors de la ponte - l'organe qui permet à la femelle de déposer les œufs (ovipositeur) et la glande phéromonale étant tout proches. Ce signal n'aurait pas un rôle sexuel pour les chenilles, mais simplifierait la recherche de la plante idéale à consommer car celle-ci serait indirectement « choisie » par la femelle. Par ailleurs, un tel message chimique pourrait être détourné pour favoriser la lutte contre ce ravageur des cultures, en agissant au stade chenille cette fois.

Plus récemment, les scientifiques de l'Inra et de l'UPMC ont élargi l'éventail d'odeurs actives sur les chenilles de *S. littoralis*, par une approche d'écologie chimique « inverse », c'est à dire en partant des récepteurs olfactifs eux-mêmes. Ainsi ils ont testé sur le comportement les différentes odeurs identifiées comme actives sur les récepteurs olfactifs exprimés chez la chenille. Cette approche, guidée par les propriétés des récepteurs, a permis l'identification de 9 composés volatils qui attirent les chenilles.

En comprenant mieux les capacités olfactives de ces larves, ces travaux ouvrent une voie prometteuse vers le développement de nouveaux pièges ou répulsifs non pas pour les papillons mais pour les chenilles de ravageurs des cultures.

RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

- Poivet E., Rharrabe K., Monsempe C., Glaser N., Rochat D., Renou M., Marion-Poll F. and Jacquin-Joly E. (2012) The use of sex pheromones as an evolutionary solution to food source selection in caterpillars. *Nature communications* 3: 1047 | DOI: 10.1038/ncomms2050
- de Fouchier A., Sun X., Caballero-Vidal G., Travaillard S., Jacquin-Joly E., Montagné N. (2018) Behavioral Effect of Plant Volatiles Binding to *Spodoptera littoralis* Larval Odorant Receptors. *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 12: 264 | DOI: 10.3389/fnbeh.2018.00264

● BRUCHE DE LA FÉVEROLE: UN EXEMPLE DE SIGNAL ● CHIMIQUE ÉMIS PAR LA PLANTE AU SERVICE DU BIO-CONTRÔLE

Bruchus rufimanus, plus communément dénommée bruche de la féverole, est un insecte spécifique de cette plante, dont le développement se fait à l'intérieur des graines. La présence de bruches dans les graines les rend impropres à la commercialisation, diminue le taux de germination des semences et présente des risques de ré-infestation des cultures.

Les chercheurs de l'Inra, en partenariat avec Arvalis - Institut du végétal, ont montré que *B. rufimanus* reconnaît la féverole sur la base de signaux chimiques émis par la plante aux stades fleurs et fruits (gousses). Ils ont également mis en évidence que la capacité de l'insecte femelle à analyser les substances volatiles présentes dans son environnement est liée à sa physiologie et à celle de la plante : lorsque la plante est au stade fleurs, l'insecte se consacre essentiellement à son alimentation, consommant le pollen et ses ovaires sont peu développés. Lorsque la plante est au stade gousses, l'insecte est en phase de reproduction, déposant ses œufs sur les gousses et ses ovaires matures sont prêts à la ponte.

Ces travaux d'écologie chimique d'un couple insecte - plante cultivée ont permis d'identifier et de formuler deux mélanges, un premier attractif pour les femelles fécondées (attractif Gousse) et un deuxième pour les mâles et les femelles avant la ponte (attractif Fleur). Ces mélanges ouvrent des perspectives prometteuses pour lutter contre la bruche de la féverole sous couvert de techniques de biocontrôle qui pourraient être basées sur l'attraction ou la perturbation olfactive. Ces résultats de recherche sont à la base de la création d'une start-up émergente, AgriOdor [www.agriodor.com].

- CONTACT SCIENTIFIQUE: Brigitte Frérot / brigitte.frerot@inra.fr - 01 30 83 31 44
Institut d'Écologie et des Sciences de l'Environnement de Paris (Inra, CNRS, Sorbonne Université, IRD, UPEC, Université Paris Diderot)



RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

- Leppik E., Pinier C., Robert C., Biarnes V., Taupin P., Thibord JB, Frérot B. (2017). L'attraction des femelles fécondées: une nouvelle voie de protection des plantes. AFPP - Onzième conférence internationale sur les ravageurs en agriculture - Montpellier 24 octobre 2014
- Leppik E., Pinier C., Robert C., Biarnes V., Taupin P., Thibord JB, Frérot B. (2017). Perspective de lutte contre les insectes monophages. Du paysage chimique à la protection des plantes. AFPP - Sixième conférence sur les moyens alternatifs de protection pour une production intégrée. Lille - 21, 22 et 23 mars 2017
- Leppik E., Pinier C., Frérot B. (2014) Paysage chimique d'une agrobiocénose : un exemple la féverole et son ravageur spécialiste *Bruchus rufimanus* AFPP - Dixième conférence internationale sur les ravageurs en agriculture - Montpellier 22 et 23 octobre 2014

- LUTTE CONTRE LE CARPOCAPSE:
- UN RÉCEPTEUR DANS LE VISEUR

Le carpocapse des pommes et des poires (*Cydia pomonella*) est un insecte ravageur présent dans les vergers. Ses larves se développent à l'intérieur des fruits. Les dégâts occasionnés par cet insecte sur les pommiers, poiriers, abricotiers et autres arbres produisant des fruits à pépins et à noyau sont considérables. Dans les années 1990, l'Inra et la société Calliope ont développé, à partir d'un virus d'insecte, un bio-insecticide naturel : la carpovirusine contre le carpocapse dans les vergers.

D'autres stratégies de piégeage existent. Par exemple : certains fruits comme les pommes et les poires émettent de l'ester de poire ou « décadiénoate d'éthyle 2,4 ». Cet odorant agit comme un puissant attractif pour les papillons et les chenilles du carpocapse. Cette substance est utilisée, en mélange avec la phéromone sexuelle de l'espèce, la codlemone, comme piège pour ce ravageur. Afin d'optimiser l'efficacité des méthodes de lutte existantes, les scientifiques cherchent aujourd'hui à comprendre comment l'ester de poire est reconnu d'un point de vue moléculaire par l'insecte.

Ainsi, des chercheurs de l'Inra, en collaboration avec des chercheurs italiens et suédois, ont identifié et caractérisé un récepteur olfactif du carpocapse qui répond à l'ester de poire. D'un point de vue évolutif, ce récepteur semble avoir évolué à partir de récepteurs olfactifs spécialisés dans la détection des phéromones sexuelles, en acquérant une nouvelle fonction. Ce récepteur apparaît donc comme une cible prometteuse pour l'amélioration du contrôle biologique du carpocapse. L'identification d'une molécule naturelle efficace sur le récepteur du carpocapse permettrait, par exemple, l'amélioration des stratégies de piégeage. À l'inverse, un antagoniste du récepteur ou un bloquant olfactif pourrait être utilisé afin d'inhiber l'attraction des insectes.



RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

► Bengtsson J.M., Gonzalez F., Cattaneo A.M., Montagné N., Walker W.B., Bengtsson M., Anfora G., Ignell R., Jacquin-Joly E., Witzgall P. (2014) A predicted sex pheromone receptor of codling moth *Cydia pomonella* detects the plant volatile pear ester. *Frontiers Ecol. Evol.* 2:33 doi: 10.3389/fevo.2014.00033

- QUAND LES INSECTES
- PILOTENT DES ROBOTS

Les performances des antennes de papillons de nuit surpassent de très loin celles des capteurs (bio)chimiques en termes de sensibilité, discrimination et dynamique de réponse.

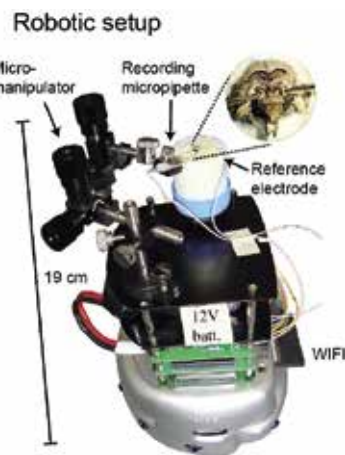
Des travaux menés en neurophysiologie des antennes d'insectes permettent aux chercheurs de l'Inra d'envisager de les transformer en biocapteurs avec pour objectifs une meilleure compréhension des mécanismes d'orientation olfactive des insectes et des perspectives appliquées en bio-contrôle et olfaction artificielle.

Ils ont donc utilisé les antennes d'insectes comme biocapteur olfactif pour développer un dispositif portable permettant de visualiser la dynamique du panache odorant sur un insecte sans modifier son comportement locomoteur. Ces travaux permettent de mieux comprendre la prise de décision de l'insecte en fonction de la détection de bouffées d'odeur. Autre application : en partenariat avec le Laboratoire lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications (CNRS, Université de Lorraine) à Nancy la mise au point d'un cyborg capable de s'orienter vers une source de phéromone. Il s'agit d'un robot sur lequel est monté un papillon dont les réponses antennaires au panache phéromonal sont enregistrées. Le signal antennaire est traduit en commandes d'orientation du robot. Ce robot « traqueur d'odeur » a permis d'évaluer des stratégies d'orientation des insectes.

● CONTACT SCIENTIFIQUE: Philippe Lucas / philippe.lucas@inra.fr - 01 30 83 37 37
Institut d'Écologie et des Sciences de l'Environnement de Paris (Inra, CNRS, Sorbonne Université, IRD, UPEC, Université Paris Diderot)

CONTACT

Emmanuelle Jacquin-Joly
emmanuelle.joly@inra.fr / 01 30 83 32 12
Institut d'Écologie et des Sciences de l'Environnement de Paris (Inra, CNRS, Sorbonne Université, IRD, UPEC, Université Paris Diderot)
Département scientifique Santé des plantes et environnement
Centre Inra Ile-de-France-Versailles-Grignon



RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

► Martinez D., Arhidi L., Demondion E., Masson J.-B., Lucas P. (2014) Using insect electroantennogram sensors on autonomous robots for olfactory searches. *J. Vis. Exp.* 90:e51704. doi: 10.3791/51704.
► Voges N., Chaffiol A., Lucas P., Martinez D. (2014) Reactive searching and infotaxis in odor source localization. *PLoS Comput. Biol.* 10(10): e1003861. doi:10.1371/journal.pcbi.1003861



2

L'ANIMAL, PARTENAIRE DE L'ÉLEVEUR

Une approche récente « One Welfare, un seul bien-être », met en avant le lien existant entre bien-être animal, bien-être humain, biodiversité et environnement, et vient compléter le concept « one health » d'une santé partagée par l'homme, l'animal et l'environnement. Alors que ce concept émerge, les chercheurs de l'Inra étudient depuis de très nombreuses années la relation homme-animal dans le domaine de l'élevage, avec une nécessaire approche multidisciplinaire : de l'éthologie à la psychologie en passant par la zootechnie et les sciences sociales. Ils développent dans ce cadre la notion de pratiques relationnelles, une notion qui existe en sciences des organisations et prenant en compte la dimension émotionnelle dans le travail. L'animal est alors considéré comme un partenaire.

En élevage, il peut exister plusieurs visions des rapports homme-animal en élevage : l'animal peut être perçu comme une ressource (viande, lait, habit, force...) mais aussi comme un partenaire : partenaire de travail, partenaire avec lequel on communique, partenaire auquel on s'attache, un être sensible ayant des émotions. Les recherches menées en particulier à l'Inra de Theix sur les relations homme-animal en élevage depuis plus de trente ans montrent que des pratiques « relationnelles », véritables stratégies de l'éleveur pour travailler efficacement et en sécurité avec ses animaux, sont autant à considérer que les pratiques de production.

De même, la prise en compte du bien-être et de la qualité de vie ne peut se concevoir sans considérer ces pratiques relationnelles. Les animaux et les humains interagissent régulièrement et construisent sur la durée des interactions futures prévisibles, qui déterminent leurs relations. Les choix que l'homme fait tout au long de la vie de l'animal depuis le choix des reproducteurs, le développement de l'individu, jusqu'à l'abattage, déterminent la façon dont l'animal perçoit son partenaire humain. En retour, la réponse de l'animal influence en permanence la perception et les futurs comportements des personnes qui s'en occupent. L'animal parfois apprivoise son éleveur autant que le contraire. Mais son comportement est souvent le miroir du comportement de ceux qui s'occupent de lui.

LES BÉNÉFICES RÉCIPROQUES D'UNE RELATION HOMME-ANIMAL POSITIVE

Un groupe de travail piloté par l'Inra composé d'éthologistes, zootechniciens, sociologues et ergonomes ont fait le point sur les connaissances scientifiques et réfléchi ensemble sur la construction des relations homme-animal, avec pour objectif de faire évoluer la formation et les pratiques des éleveurs dans le sens d'un meilleur bien-être réciproque. L'idée du projet est de mettre l'accent sur la construction de la relation homme-animal en considérant les points de vue des deux protagonistes.

Pour les éleveurs, une « bonne » relation se caractérise souvent par l'absence de peur de l'animal, qui leur permet de travailler efficacement et en sécurité. Mais la réalité est parfois autre. Il faut savoir qu'en élevage bovin, il y a en moyenne un accident grave par éleveur tous les 4 ans avec arrêt de travail, lié à des coups ou des bousculades. La formation mise en place prône un point de vue positif où il ne s'agit pas seulement d'éviter les désagréments, mais de créer une relation bénéfique. On permet à l'éleveur de réfléchir à sa propre relation homme-animal au regard des résultats de nombreuses études scientifiques aujourd'hui existantes et sur le fait qu'il a tout à y gagner, non seulement en termes de satisfaction personnelle, mais en termes de production et de santé des animaux. Il existe de nombreux travaux qui montrent que les performances techniques plus optimales peuvent dépendre de cette relation homme-animal. Côté éleveur, il faut lever le champ des possibles et souvent prendre en compte le facteur temps. En effet, une des contraintes du métier d'éleveur est son exigence en présence, mobilisant bien au-delà de 35h hebdomadaires. Beaucoup d'éleveurs déplorent en outre l'accroissement du travail de bureau. Dans ce contexte, quel temps accorder au contact avec les animaux, comment être efficace dans la façon de construire cette relation homme-animal ? La réponse apportée dépend bien sûr de nombreux facteurs, dont le système d'élevage, mais aussi de la personnalité de l'éleveur, sa perception de l'animal, son comportement et sa logique d'élevage. La relation homme-animal peut être subie ou au contraire construite positivement au travers des pratiques relationnelles adaptées.



QU'APPORTENT LES TRAVAUX EN ÉTHOLOGIE SUR CETTE QUESTION ?

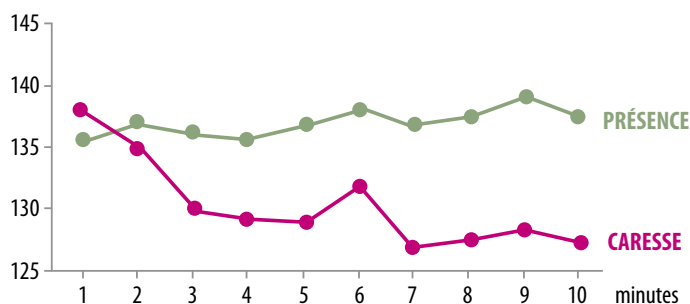
L'éthologie se place du point de vue de l'animal et cherche à comprendre son ressenti. Elle se fonde sur l'observation du comportement des animaux, la compréhension de leurs besoins, de leurs attentes. Elle nous permet de prendre de la distance dans l'étude des relations homme-animal, et de ne pas considérer que notre seul point de vue d'humain. L'éthologie permet de définir et d'étudier la relation dans un cadre conceptuel fondé sur les interactions interindividuelles, la connaissance du monde sensoriel, émotionnel et cognitif propre à chaque animal (l'Umwelt), les éléments de communication et les mécanismes de création de liens entre individus.



Les travaux réalisés à l'Inra entre génétique et éthologie montrent que tous les herbivores n'ont pas les mêmes prédispositions génétiques à construire cette relation avec l'homme. Ils montrent que certains animaux du fait de leur patrimoine génétique sont plus faciles à approcher, ou plus facile à contenir. La qualité des interactions est aussi particulièrement déterminante.

Les chercheurs des centres Inra Auvergne-Rhône-Alpes, Val de Loire et Bretagne ont étudié par exemple les effets des caresses sur des agneaux, des brebis, des vaches laitières ou encore des porcs dans des projets de collaborations internationales. Il ne s'agit pas de considérer l'animal d'élevage comme un animal de compagnie mais de comprendre l'impact de ces contact tactiles « humains » sur la relation homme-animal. Ces caresses habituent-t-elles seulement l'animal au contact humain ou leur procurent-t-elles aussi du plaisir ? Nous avons par exemple travaillé sur des agneaux placés en allaitement artificiel, ce qui est le cas lorsque la mère ne peut pas les allaiter. On observe souvent des troubles chez ces agneaux, comme une croissance ralentie, des diarrhées, voire une mortalité assez élevée. Si l'on instaure des moments répétés de caresses (3), les agneaux prennent des postures d'apaisement et leur rythme cardiaque baisse sensiblement. Ils manifestent des signes d'attachement envers l'expérimentateur, comme si celui-ci devenait un substitut maternel. Ces travaux sont encourageants et sont complétés par des enquêtes dans différentes productions qui montrent qu'un éleveur plus attentif à ce genre de contact avec les animaux a souvent effectivement une meilleure facilité de manipulation, une meilleure santé, une meilleure production de ses animaux.

Fréquence cardiaque (batt/min)



Diminution de la fréquence cardiaque chez des jeunes agneaux qui reçoivent des caresses répétées. Expérience réalisée sur des agneaux en allaitement artificiel. © Inra

De façon générale, les relations établies dans le jeune âge de l'animal déterminent son attitude de peur ou de confiance vis-à-vis de l'éleveur. Chez l'animal plus âgé, certaines périodes de la vie sont plus propices à l'établissement de la relation homme-animal : le sevrage, la gestation...

Ainsi passer un minimum de temps avec ses animaux dans cet objectif d'une meilleure relation homme-animal est tout sauf du temps perdu. Même dans une optique qui privilégie les objectifs économiques, l'établissement d'une bonne relation avec les animaux peut être considéré comme un facteur de performance. Le temps est le nerf, non de la guerre, mais de la paix... et du bien-être.

Les recherches menées à l'Inra permettent de définir quelle qualité de vie on donne aux animaux. Les deux exemples suivants illustrent ces recherches sur la construction de la relation homme-animal et des pratiques participant au bien-être dans cette relation dans un cadre où l'élevage est de plus en plus technologique.

L'ÉLEVAGE DE PRÉCISION AU SERVICE DU BIEN-ÊTRE ANIMAL

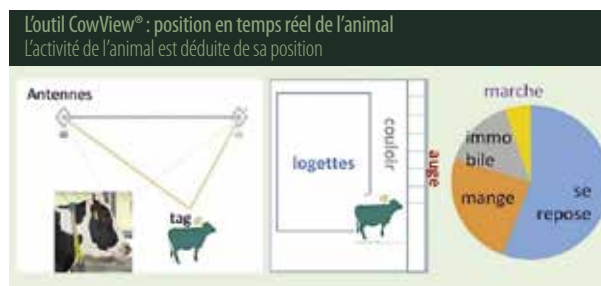
Les outils de précision sont en pleine expansion dans les élevages, la plupart du temps pour améliorer l'efficacité des productions. De nombreux dispositifs utilisent l'activité des animaux pour détecter ceux qui sont malades ou en chaleurs. L'activité est encore peu utilisée pour évaluer le comportement et le bien-être animal. Or le comportement reflète généralement le ressenti de l'animal, à l'origine de son bien-être ou au contraire mal-être.

Les capteurs, les objets numériques, connectés, voire intelligents envahissent notre monde et l'élevage n'est pas exempt de cette tendance. Celle-ci est source d'opportunités notamment en termes de qualité de travail pour l'éleveur, mais cette évolution fait débat dans le même temps : sécurité des données, propriété des données, risque de dépendance... mais aussi une tendance vers un élevage qui peut paraître de plus en plus gigantesque et déshumanisé. L'outil connecté doit rester un outil et pas une fin en soi.

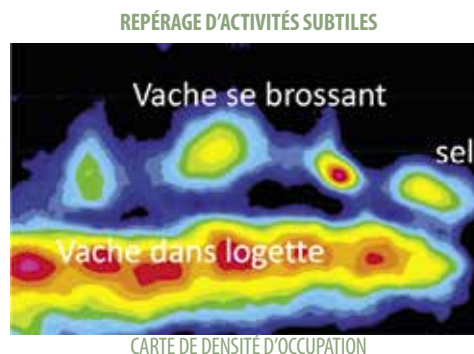
La recherche nécessaire en amont des applicatifs nécessite une approche pluridisciplinaire et le centre Inra Auvergne-Rhône-Alpes (ARA) est bien placé en ce domaine, ainsi que le centre Irstea de Clermont-Ferrand, et ce d'autant plus qu'il existe des liens étroits avec la profession. Les nouvelles technologies peuvent accompagner des solutions plus douces, plus extensives que les facettes productivistes traditionnellement mises en avant, et là aussi faciliter le travail de l'éleveur et par là améliorer la relation Homme-Animal. Le travail de la recherche peut être alors d'enrichir des outils existants avec de nouveaux développements, notamment en termes de détection précoce des maladies, de suivi du comportement social.



L'activité de l'animal peut être estimée grâce à des accéléromètres, des analyses d'image ou encore des capteurs de position. Par exemple un système « GPS-like » permet de repérer la position d'une vache en temps réel (1 coordonnée x,y dans le bâtiment/s), grâce à un système de triangulation via des antennes fixes disposées dans le bâtiment et un collier attaché au cou de l'animal. L'activité de l'animal est déduite de sa position dans le bâtiment (logette, table d'alimentation, couloir...). Le système CowView (fournisseur GEA) repère ainsi les hyper- ou hypoactivité sur la base de 4 activités (mange, se repose, se déplace, reste debout immobile) et la distance parcourue par jour. Les hyperactivités sont proposées comme signe de chaleurs et les hypo-activités comme signe d'une maladie.



Un système CowView est installé sur le site expérimental HerbiPôle de l'Inra ARA. Les chercheurs de l'unité de recherche sur les herbivores de l'Inra conduisent des travaux pour aller plus loin dans l'utilisation de ces données qui semblent relativement frustes (la position dans le bâtiment) mais peuvent fournir des indicateurs complexes. Ils ont ainsi montré que des variations de rythme journalier d'activité précèdent de 1 à 2 jours l'apparition de signes cliniques de mammite. L'acidose subclinique est quant à elle repérable par une activité plus importante près de la pierre à sel. L'évolution des groupes sociaux peut également être suivie, en particulier lors de l'introduction de nouveaux animaux : même au bout de 2 semaines, les vaches nouvellement introduites ne se mêlent pas aux résidentes. De même, le suivi en continu de l'utilisation d'objets d'enrichissement comme une brosse automatique pourrait permettre de comprendre leur utilité pour chaque animal mais aussi détecté très précocement des changements de son état. Des perspectives sont donc offertes pour évaluer la cohésion des groupes sociaux, et repérer des atteintes au bien-être des animaux - par des altérations du comportement - que ces atteintes soient dues à une maladie, une douleur ou un stress ou encore un changement d'environnement.

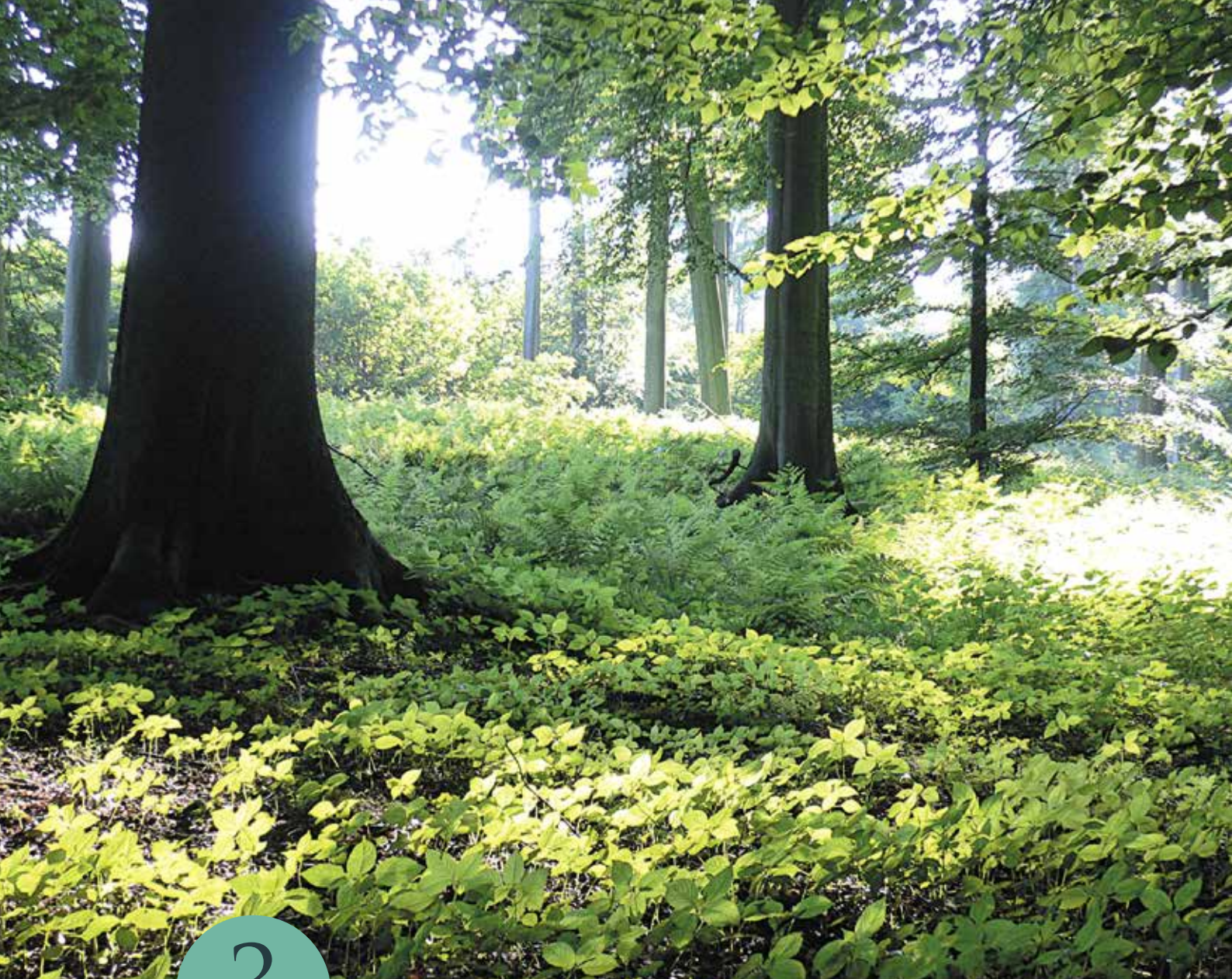


OBSERVATION ASSISTÉE ET MÉCANISATION DES TÂCHE D'ASTREINTE : UNE RELATION HOMME-ANIMAL À REDÉFINIR ET UN GAIN DE TEMPS À RÉINVESTIR PAR L'ÉLEVEUR DANS SA RELATION AVEC LES ANIMAUX

De nombreux dispositifs sont déjà en place dans les élevages, pour contrôler l'atmosphère des bâtiments, distribuer les aliments, détecter les chaleurs, garder les animaux au pâturage... Les robots de traite par exemple sont devenus de véritables laboratoires, munis de capteurs qui mettent à profit le moment de la traite pour mesurer l'état général de la vache : rythme cardiaque, température corporelle et activité physique. Plusieurs études ont montré l'avantage de ces technologies pour l'éleveur, en estimant le temps gagné en manipulation par rapport au temps passé à entretenir les appareils et interpréter les masses de données générées. Le gain de temps pour l'éleveur peut être important : jusqu'à 3h par jour pour 60 vaches laitières avec l'automatisation de l'alimentation, jusqu'à 2h par jour grâce à la détection automatisée des chaleurs pour 400 vaches laitières en vèlages groupés.

Cependant, si ces technologies font gagner du temps, elles se substituent à des contacts qui peuvent être agréables avec les animaux, lors de la traite ou de l'alimentation. Si les contacts avec l'éleveur se réduisent aux interventions pénibles, comme les vaccinations ou le parage, la relation homme-animal peut en être altérée. Il s'agit donc d'un des grands enjeux à explorer dans les élevages d'aujourd'hui en pleine évolution. Ce risque peut néanmoins vraisemblablement être évité si l'éleveur garde cette relation homme-animal comme un objectif d'élevage et en établissant des pratiques relationnelles adéquates.





3

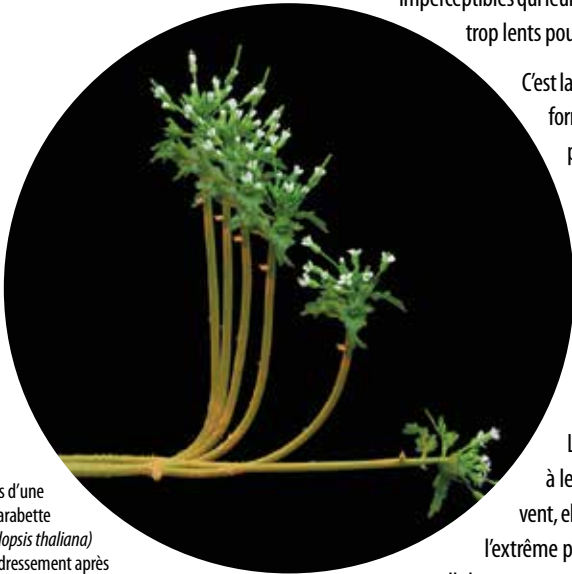
LES PLANTES, SENSIBLES À LEUR ENVIRONNEMENT ET CAPABLES DE S'Y ADAPTER EN MOUVEMENTS

Les scientifiques ont établi récemment que les plantes sont capables de percevoir leur environnement, et de s'y situer, et qu'elles ont la capacité de réagir aux modifications de cet environnement. Les chercheurs de l'Inra s'intéressent notamment à l'effet du vent sur les plantes. Comment le perçoivent-elles, et quelles capacités mobilisent-elles pour réagir ? Le vent, et notamment les épisodes de tempêtes qui risquent de se multiplier dans le contexte du changement climatique, ont des répercussions sur les cultures [problème de verse] et les forêts [problème de casse, mais aussi de verse et de qualité des bois produits]. Les nouvelles connaissances sur le fonctionnement des plantes ouvrent des pistes à la communauté agronomique et forestière, qui se mobilise pour mitiger les effets du changement climatique sur les cultures et les forêts.

Se tenir debout face au vent et à la gravité tout en déployant son feuillage pour capter la lumière est un grand challenge pour une plante. En effet son feuillage est aussi une masse à porter et une voile tendue au vent. De plus pour ne pas s'affaisser sous son propre poids, sa tige doit être suffisamment rigide. Mais alors elle devient un bras de levier qui amplifie la force liée à la prise au vent ! Et tout cela varie continûment au cours de la croissance de la plante ! Heureusement, la sélection naturelle depuis la conquête de la terre ferme par les plantes leur a conféré une double capacité :

- › La capacité de sentir les vents un peu inhabituels afin de mesurer son degré d'exposition au vent et le niveau de risque subi, afin le cas échéant de se renforcer : c'est une stratégie de résistance adaptée à la situation
- › La capacité à sentir des inclinaisons qui tirent et à les corriger : c'est une stratégie de contrôle postural et de résilience en cas d'accident de verse

Commençons par le contrôle postural et la résistance à la verse. À chaque instant, les plantes effectuent des mouvements imperceptibles qui leur permettent de se maintenir debout. Nous ne sommes pas conscients de ces mouvements, trop lents pour nous, même si une plante qu'on incline peut parfois se redresser en quelques heures.



Formes successives d'une inflorescence de l'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*) au cours de son redressement après une inclinaison à l'horizontale. On voit nettement que l'ensemble de la tige commence par se courber vers le haut, mais ensuite la partie haute se rectifie progressivement et la courbure se concentre à la base (taille de la hampe = 10 cm, durée totale 20h).

© Inra - R. Bastien / S. Douady / B. Moulià

C'est la combinaison de la perception de la gravité par les plantes et leur perception de leur propre forme (proprioception) qui permet aux plantes de rester droites contre vents et gravité. Si nous pouvions voir les mouvements des plantes, nous les verrions en permanence maintenir leur équilibre et leur posture. C'est ce processus « sensori-moteur » qui permet aux agriculteurs d'avoir des champs de blés dressés, et aux forestiers de récolter des troncs droits. Ce contrôle postural est rendu possible par des mouvements actifs (appelés gravitropisme), sous l'effet moteur de la croissance différentielle ou de bois de réaction. La réussite de ce contrôle postural est très importante pour la plante, mais aussi pour ses usages agronomiques (récupération des verses des céréales) ou forestiers (défauts de forme des troncs et de qualité du bois).

Les chercheurs de l'Inra participent à la compréhension des mécanismes en jeu, et contribuent à les décrypter. Ils ont par exemple démontré que si les plantes oscillent fortement dans le vent, elles ne confondent pas ce balancement avec une perte de verticalité. Ils ont aussi découvert l'extrême précision leur permettant de percevoir ces inclinaisons, grâce à un système composé de cellules contenant des grains d'amidon (statolithes). Ces résultats ouvrent des perspectives en agronomie, mais aussi dans le domaine du biomimétisme pour la mise au point de capteurs de position de haute précision. Retrouvez le détail de ces résultats dans la rubrique « Des résultats majeurs » p. 17.

La perception du vent et la modification de la croissance et de la forme de la plante est l'autre série de découvertes faite par l'équipe de Bruno Moulià. La plante sent quand elle ploie sous le vent et enclenche alors une réponse dite de thigmomorphogénèse par laquelle elle réduit sa croissance en hauteur, augmente la croissance en diamètre de ses tiges, modifie les propriétés mécaniques de ses tissus constitutifs et accentue son ancrage racinaire. Ces réponses mobilisent de la signalisation à longue distance au sein de la plante dont les scientifiques ont montré qu'elle utilise un canal original dans le vivant, basé sur des surpressions hydrauliques dans leur système vasculaire.

Évidemment cette capacité à répondre au vent est d'autant plus cruciale que la plante est grande ; elle est donc vitale pour les arbres. Les scientifiques ont combiné les dernières connaissances sur les réponses des plantes au vent avec celles sur les réponses à la lumière pour construire un modèle de développement d'arbre. Les arbres virtuels sont capables d'intercepter la lumière, de répartir les produits de la photosynthèse entre organes, d'initier des branches, mais aussi de produire des graines qui germent après être tombées. Surtout, le modèle inclut deux découvertes récentes : la localisation des nouvelles branches qui bourgeonnent dépend de la lumière reçue et la croissance en diamètre des troncs et des branches est pilotée par la perception des déformations au vent (thigmomorphogénèse). En simulant virtuellement 200 000 ans de sélection naturelle dans des forêts virtuelles, ils ont pu montrer que la forme arborée a pu émerger de la seule combinaison de la réponse à la lumière et au vent.

Enfin, peut-être encore plus surprenant, il a été montré en conditions naturelles que les plantes sont capables de distinguer les vents courants des coups de vent inhabituels qui seuls indiquent l'exposition au risque de tempête ; ce grâce à une mémorisation et à un processus d'habituation, dont l'équipe étudie actuellement les mécanismes moléculaires.

VERS QUELLES APPLICATIONS POUR L'AGRICULTURE ET LA FORESTIERIE ?

En agriculture, la verse est un accident mécanique de végétation touchant certaines cultures, principalement les céréales, mais aussi les légumineuses, le colza, le tournesol. Elle se traduit par une inclinaison permanente des tiges, qui ne peut être compensée que par un mouvement gravitropique actif (s'il n'y a pas de casse des tiges). La verse peut être due à l'effet du vent, favorisée par les intempéries (forte pluie, vent fort, etc.). Un travail interdisciplinaire avec notamment des généticiens et des sélectionneurs a débuté pour étudier des blés capables de verser puis de se redresser plus facilement, ainsi mieux adaptés aux conséquences attendues du changement climatique. Jusqu'à présent, les études étaient principalement menées sur les caractères de résistance à la verse, liés à la force maximale de vent que pouvait supporter la culture sans verser. Aujourd'hui, ces projets visant à limiter les dégâts sur les cultures, s'orientent sur l'étude de caractères de résilience, liés à la capacité des plantes à conserver un système racinaire fonctionnel leur permettant de se redresser plus facilement après la verse. En effet si les épisodes venteux en végétations deviennent trop forts, la stratégie de faire jouer à quelques racines un rôle de fusible mécanique puis de se redresser une fois la tempête passée peut être moins coûteux qu'une stratégie de résistance à tout prix, qui conduit à renforcer beaucoup la tige, au détriment du rendement.



Concernant la gestion forestière, le vent est bien connu comme facteur de dégâts. Cependant, et compte tenu des résultats sur la perception du vent par les arbres et des réactions qu'ils mettent en place pour y résister, le vent doit désormais être considéré comme un facteur de croissance. Il intervient ainsi dans les dimensions et les formes des parties aériennes et souterraines de ces organismes. Mais surtout il est un des facteurs majeurs de la production de bois. L'ensemble de ces nouvelles connaissances sont mobilisées aujourd'hui pour initier des réflexions sur la gestion des peuplements forestiers en collaboration avec les gestionnaires. On comprend comment les éclaircies pourraient permettre aussi de moduler la réponse des arbres au vent, et la production de bois.

DES RÉSULTATS MAJEURS

LE TOUR DE FORCE PERCEPTIF DES PLANTES POUR SE MAINTENIR À LA VERTICALE

Contrairement à ce qui se passe chez l'Homme, les plantes réussissent à percevoir leur inclinaison par rapport à la gravité sans se laisser perturber par l'intensité des forces liées aux poids et accélérations. Dans une étude qui vient de paraître dans *Scientific Reports*, des chercheurs de l'Inra, du CNRS et de l'Université Blaise Pascal démontrent que si les plantes oscillent fortement dans le vent, elles ne confondent pas ce balancement avec une perte de verticalité. Ces travaux laissent entrevoir des applications prometteuses tant dans les domaines de l'agronomie que du biomimétisme avec la conception par exemple de capteurs de position miniaturisés.

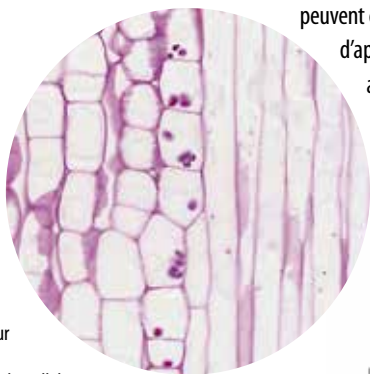
Nous partageons avec la plupart des plantes la station debout, verticale. On sait depuis longtemps que nous contrôlons la verticalité de notre posture grâce à une perception de la gravité au sein de notre oreille interne, en particulier au niveau du système otolithique, un ensemble de petits « cailloux » pris dans un gel et reposant sur des cils mécanosensibles.

Les plantes elles aussi possèdent un système de perception de leur orientation par rapport à la verticale, mais il est miniaturisé. Il s'agit d'un tas de petits grains d'amidons appelés statolithes qui sédimement au sein de cellules spécialisées appelées statocytes et distribuées tout au long des tiges des plantes. Toutefois, une différence a attiré l'attention des scientifiques : si nous sommes secoués ou lorsque nous sommes soumis dans un manège à une accélération centrifuge, nous perdons le sens de la verticalité. En effet, nous savons depuis Einstein qu'un observateur local (un organisme, une cellule) ne peut distinguer les forces gravitationnelles des forces inertielles liées à des accélérations, comme par exemple celles induites par des secousses ou encore par la force centrifuge. Et notre oreille interne est très sensible à l'intensité de ces forces.

Or, les plantes sont très souvent agitées par le vent, sans pour autant perdre le sens de la verticale. Comment font-elles pour ne pas - comme nous - avoir « a tête qui tourne » ? C'est la question que s'est posé un groupe de chercheurs associant des mécanobiologistes de l'Inra et de l'Université Blaise Pascal et des physiciens du CNRS. Ils ont réalisé un « manège à plantes » en disposant une chambre de culture de plantes sur une centrifugeuse à deux axes de rotations, similaire à celles utilisées pour

entraîner les astronautes, et suivi de manière précise les mouvements de redressement des plantes (voir schéma ci-dessous). En analysant plusieurs centaines de plantes appartenant à 4 espèces représentatives des grands types de plantes à fleurs cultivées (le blé, la lentille, le tournesol et l'arabette des dames), ils ont montré qu'à la différence de notre oreille interne, les plantes sont capables de percevoir leur inclinaison par rapport à la gravité sans être affectées par l'intensité des forces gravitationnelles ou inertielles qu'elles subissent. Les plantes peuvent ainsi osciller fortement dans le vent sans confondre ce balancement avec une perte durable de verticalité. Ce dispositif expérimental est désormais combiné à un microscope afin de pouvoir suivre en temps réel les mouvements des statolithes dans les cellules et décrypter les phénomènes cellulaires et moléculaires qui permettent aux plantes ce « tour de force » perceptif.

Ces dernières années, les chercheurs ont révélé que les plantes partageaient avec nous le contrôle postural en combinant sens de la verticalité et aussi celui de la configuration de leur corps via le sens de la proprioception. On sait maintenant qu'elles peuvent connaître la verticalité même lorsqu'elles sont chahutées. Ces résultats inédits débouchent sur deux types d'applications. La première, agronomique, devrait permettre d'améliorer la capacité des plantes à se redresser après qu'une tempête les ait versées, un problème source de près de 10% de perte de rendement sur les céréales au niveau mondial. La deuxième application est biomimétique : en s'inspirant des cellules statocytes des plantes, on doit pouvoir concevoir des capteurs de positions miniaturisés plus performants.



Dans les statocytes, des grains d'amidon appelés statolithes (violet) sédimentent sous l'action de la gravité et leur position est perçue par un capteur mécano-biologique. Un mouvement qui informe les cellules sur leur inclinaison par rapport à la gravité.

© Nicole Brunel (PIAF, équipe MECA)

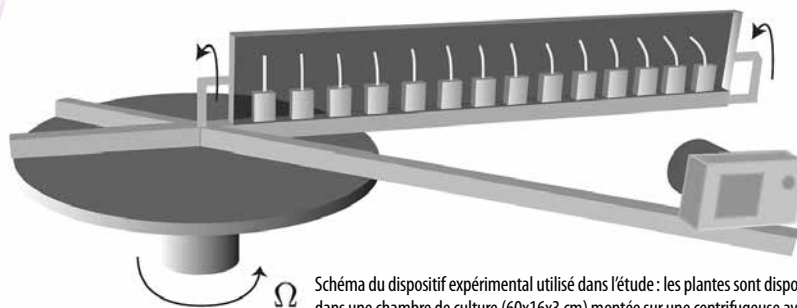


Schéma du dispositif expérimental utilisé dans l'étude : les plantes sont disposées dans une chambre de culture (60x16x3 cm) montée sur une centrifugeuse avec 2 axes de rotation sur laquelle un appareil photo est monté afin de filmer précisément le mouvement de redressement des plantes. La rotation de la centrifugeuse autour de l'axe vertical permet d'obtenir différents niveaux d'accélération et de force centrifuge, alors que la rotation tête-bêche lente des plantes permet de compenser plus ou moins la perception par les statocytes de la gravité terrestre (effet clinostat). Enfin l'inclinaison de chaque plante peut être ajustée. © Inra - H Chauvet, O Pouliquen, Y Forterre, V Legué, B Moullia

RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

► Hugo Chauvet, Olivier Pouliquen, Yoël Forterre, Valérie Legué & Bruno Moullia. *Scientific Reports*, 14 octobre 2016. doi:10.1038/srep35431 – hal-01381357

COMMENT LES PLANTES RESENTENT-ELLES SI PRÉCISÉMENT LA GRAVITÉ ?

Les plantes sont capables de sentir des inclinaisons mêmes très faibles. Pourtant, le mécanisme végétal pour mesurer la gravité est composé de grains microscopiques, un outil de détection de l'inclinaison très peu précis a priori. Des chercheurs du CNRS, de l'Inra et de l'Université Clermont Auvergne ont expliqué ce curieux paradoxe en observant que ces grains sont agités en permanence dans les cellules végétales, ce qui confère au système granulaire des propriétés proches de celles d'un liquide, comme dans un niveau à bulle. Ces résultats ont été publiés le 30 avril 2018 dans la revue *PNAS*.

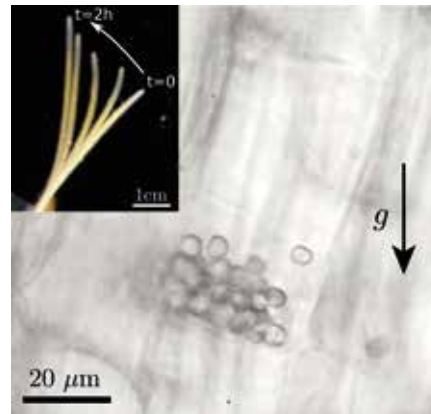
Si l'on penche une plante, celle-ci corrigera sa croissance pour pousser à nouveau à la verticale. Mais comment l'a-t-elle senti ? Grâce à des « inclinomètres » cellulaires : des cellules remplies de grains d'amidon microscopiques, les statolithes. La position du tas de grains dans les cellules indique le bas et guide ainsi l'élongation de la plante dans la direction qui lui permet de revenir à la verticalité, en modifiant la distribution d'une hormone de croissance végétale.

Le secret des plantes réside dans leur extrême sensibilité à la gravité, même pour les plus petites inclinaisons. Or, a priori, un empilement de grains constitue un piètre inclinomètre : frottements et enchevêtrements limitent normalement l'écoulement des grains, ce qui rend le système inopérant en dessous d'un angle critique... Sauf chez les plantes, où les statolithes surprennent par leur précision.

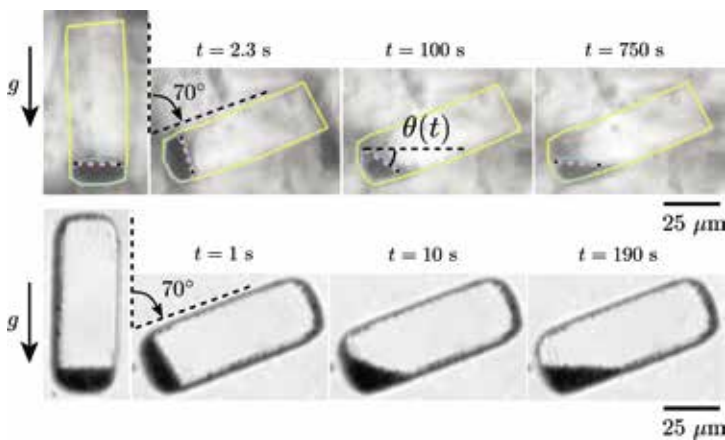
Des chercheurs de l'Institut universitaire des systèmes thermiques industriels (CNRS/Aix Marseille Université) et du laboratoire de Physique et physiologie intégratives de l'arbre en environnement fluctuant (Inra/Université Clermont Auvergne) se sont donc associés pour résoudre ce paradoxe. Ils ont tout d'abord observé directement le mouvement des statolithes en réponse à une inclinaison et ont découvert que ces grains ne se comportent pas comme un milieu granulaire classique : ils se déplacent et coulent dans la cellule quel que soit l'angle qu'on lui impose. Comme un liquide, la surface du tas de statolithes finit toujours par revenir vers l'horizontale. Mais comment les cellules font-elles pour « fluidifier » le tas de grain ?

Pour élucider l'origine de ce comportement, les chercheurs ont poursuivi leur étude en mettant au point un système analogue aux statolithes des cellules végétales, constitué de microbilles dans des cellules artificielles de même dimension. La comparaison entre les deux systèmes a permis de conclure que la fluidité globale des statolithes découle de leur agitation individuelle : grâce à ses moteurs moléculaires, la cellule brasse activement les grains, ce qui leur permet de ne pas rester bloqués les uns sur les autres et confère au système, sur le temps long, des propriétés proches de celles d'un liquide. Ce comportement est essentiel pour la plante, car il lui permet de ne pas avoir de seuil de sensation et de percevoir même les petites inclinaisons, sans être perturbée non plus par les agitations rapides liées au vent.

Ces travaux permettent de comprendre l'origine de la grande sensibilité des plantes à la gravité en élucidant en partie la dynamique des statolithes. S'ils doivent encore être complétés, notamment pour comprendre comment la position des statolithes est détectée, ils ouvrent déjà la voie à des applications industrielles bioinspirées comme le développement d'inclinomètres miniatures robustes, offrant une alternative aux gyroscopes ou accéléromètres utilisés aujourd'hui.



Redressement d'un germe de blé initialement incliné et zoom une cellule montrant l'empilement de statolithes (micrograins d'amidon) à l'origine de la détection de la gravité par les plantes.
© PNAS, Yoel Forterre/Olivier Pouliquen



Comparaison entre une avalanche de statolithes après inclinaison de la cellule (haut) et un système biomimétique constitué de particules microscopiques (microbille de silice agitée par la température) immergées dans une cavité remplie d'eau. Dans les deux cas, la surface du tas retrouve l'horizontale à la fin de l'avalanche, contrairement à l'empilement de grains classiques.

© Yoel Forterre/Olivier Pouliquen/Antoine Bérut

RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

► Antoine Bérut, Hugo Chauvet, Valérie Legué, Bruno Moullia, Olivier Pouliquen, and Yoël Forterre. Gravisensors in plant cells behave like an active granular liquid. PNAS, le 30 avril 2018.



LES VÉGÉTAUX ONT LE SENS DE LA RECTITUDE !

À chaque instant, les plantes effectuent des mouvements imperceptibles qui leur permettent de se maintenir debout. Elles sont soumises en effet au double défi de la gravité et du vent, et elles ne peuvent rester droites que par un contrôle actif. Pour la première fois, des chercheurs de l'Inra et du CNRS ont montré que le port dressé ne résulte pas de la seule perception de la gravité : les plantes doivent aussi percevoir leur propre courbure, et la rectifier. Ce travail permet par exemple de mieux comprendre comment les arbres forestiers peuvent rester droits au fil des ans. Le résultat de ces recherches, publié dans la revue des *PNAS* la semaine du 3 décembre 2012, fournit de nouvelles pistes pour l'amélioration génétique de la forme des troncs ou de la résilience à la verse des cultures ¹.

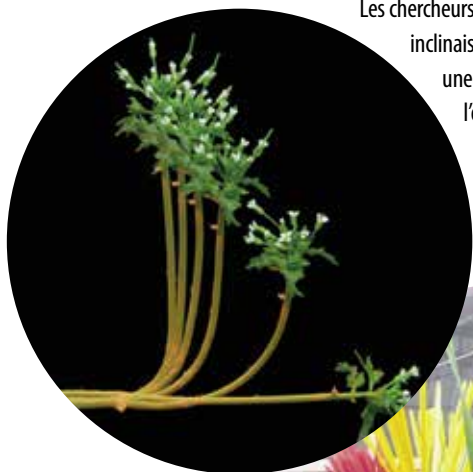
POURQUOI LES ARBRES ET LES BLÉS SONT DROITS ?

Pour conserver leur port érigé, les plantes terrestres doivent en permanence réagir activement aux perturbations liées à l'augmentation de leur masse ou à des variations d'inclinaison de leur ancrage (verse, terrains en pente). Ce contrôle postural est rendu possible par des mouvements actifs, sous l'effet moteur de la croissance différentielle ou de bois de réaction ². Sa réussite est très importante pour la plante, mais aussi pour ses usages agronomiques (récupération des verses des céréales) ou forestiers (défauts de forme des troncs et de qualité du bois). Étudiés depuis Darwin et connus sous le nom de gravitropisme, les mécanismes de contrôle de ce mouvement actif étaient encore mal connus.

LES PLANTES PERÇOIVENT LEUR PROPRE FORME ET LA RECTIFIENT

Les chercheurs ont montré que les plantes ne peuvent pas maintenir leur port érigé à l'aide de la seule perception de leur inclinaison par rapport à la gravité. Il faut lui adjoindre une perception continue de la propre courbure de leurs tiges et une tendance à la rectification de celle-ci. Il s'agit ainsi d'un phénomène de *proprioception*, comparable à ce que l'on rencontre chez les animaux et les humains et qui permet aux organismes d'avoir le sens de leur forme et de leur mouvement. Grâce à cette découverte, les chercheurs ont proposé et validé un modèle mathématique universel reproduisant le contrôle complet des mouvements de redressement sur 11 espèces de plantes à fleurs terrestres, et sur des organes allant de la minuscule germination du blé à des troncs de peupliers. Ce modèle montre que le caractère contrôlant la dynamique du mouvement et la forme finale de la plante est un ratio entre sa sensibilité à la gravité et sa sensibilité proprioceptive, et que ce ratio doit être ajusté à la taille de la plante. De plus, une méthode de caractérisation rapide et sans contact avec la plante (par analyse d'images) de ce ratio a été développée.

Ces résultats modifient l'image que nous avons de la sensibilité des végétaux, en montrant l'importance de la proprioception, à l'instar de ce qui a cours chez les animaux et les humains. Par ailleurs, ils fournissent de nouveaux concepts et outils pour l'amélioration génétique de la capacité des cultures à être plus résilientes à la verse, et des arbres à produire des fûts rectilignes et des bois de bonne qualité. Ils aideront enfin les modélisateurs à mieux prédire les conséquences des changements climatiques, qui risquent de se traduire aussi par une modification du régime des vents.



¹ En agriculture, la verse est un accident mécanique de végétation touchant certaines cultures, principalement les céréales, mais aussi les légumineuses, le colza, le tournesol. Elle se traduit par une inclinaison permanente des tiges, qui ne peut être compensée que par un mouvement gravitropique actif (s'il n'y a pas de casse des tiges). La verse peut être due soit à l'effet du vent, soit à une instabilité de la tige qui ne peut plus tenir sous son propre poids (flambage). Elle est favorisée par les intempéries (forte pluie, vent, etc.), mais aussi par toute croissance exagérée des tiges comme par exemple celle résultant d'un excès de fumure azotée, et par des affaiblissements de la base des tiges résultant d'attaques parasitaires.

² Le bois de réaction est un bois qui permet la motricité des parties ligneuses des arbres. Il présente, chez les plantes à fleurs, une forte tendance au retrait au moment de sa maturation. Lorsqu'un secteur de bois de réaction se forme, il agit donc comme un hauban interne qui se met en tension et permet à l'arbre de se courber activement. Sa formation est régulée par la plante en fonction des perceptions qui sont étudiées dans le présent travail.

- LA SENSORI-MOTRICITÉ DES PLANTES,
- LEUR PERCEPTION D'ELLES-MÊMES ET LEUR SENS DE L'ÉQUILIBRE

À chaque instant, les plantes effectuent des mouvements imperceptibles qui leur permettent de se maintenir debout. Nous ne sommes pas conscients de ces mouvements, car ils sont trop lents pour nous, même si une plante qu'on incline peut parfois se redresser en quelques heures. Mais si on perturbe ce système de contrôle, par exemple par des mutations ou des drogues, on s'aperçoit vite que les plantes titubent et finissent par tomber (à l'image de l'effet de l'alcool chez les humains).

Or, beaucoup de gens (et même des scientifiques) en sont restés aux conceptions qui ont eu cours d'Aristote jusqu'à Buffon et qui voulaient que la différence majeure entre animaux et végétaux tenait à l'absence de sensori-motricité de ces dernières (à l'exception de quelques curiosités comme les plantes carnivores). Cette idée reçue a été mise à mal dès les travaux de Charles et Francis Darwin sur la puissance des mouvements de croissance des plantes. Ces mouvements orientés ont reçu le nom de tropisme (du grec Tropos, Trepain se tourner vers), et le mouvement de redressement et d'orientation selon la gravité a été nommé gravitropisme. C'est grâce au gravitropisme que les germinations sortent de terre, que les plantes poussent vers le haut, et que nos futaies sont belles. Mais l'attention sur les premières phases de la réponse a occulté le fait que la perception de la gravité ne permettait pas à une tige dont la base a été inclinée de se redresser. Il est désormais clair que les plantes ont le sens de leur forme et de leur mouvement, un sens d'elle-même (appelé de ce fait proprioception).

C'est la combinaison de la perception de la gravité et de la proprioception de leur courbure, contrôlant une motricité leur permettant de se courber activement, qui permet aux plantes de rester droites contre vents et gravité. Si nous pouvions voir les mouvements des plantes, nous les verrions en permanence maintenir leur équilibre et leur posture. Et c'est ce processus sensori-moteur qui permet aux agriculteurs d'avoir des champs de blés dressés, et aux forestiers de récolter des troncs droits. Mais les premières analyses ont montré une grande variabilité génétique entre espèces et au sein des espèces. On peut donc espérer améliorer encore ces performances et aider les plantes à se tenir « encore plus droites ».



RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

- Renaud Bastien, Thomas Bohr, Bruno. Moullia.† *, Stéphane. Douady. †, 2013. A unifying model of shoot gravitropism reveals proprioception as a central feature of posture control in plant. *PNAS* 110 (2) : 755–760 († co- directeurs de la recherche, * auteur pour la correspondance).
- Renaud Bastien, Stéphane. Douady, Bruno. Moullia.† *, 2015. A Unified Model of Shoot Tropism in plants: Photo-, Gravi- and Propio-Ception. *PLOS Computational Biology*, 10.1371/journal.pcbi.1004037 Feb (co PI authors, * corresponding author).
- Olivier Hamant . Bruno. Moullia .2016. How do plants read their own shapes ? *New Phytologist* (Tansley Insight). 212 (2)/ : 333-337 doi: 10.1111/nph.14143

COMMUNICATION CHEZ LES PLANTES, UN NOUVEAU MÉCANISME BASÉ SUR UNE HISTOIRE D'EAU

Dans la nature, les plantes sont soumises à des sollicitations mécaniques externes qui affectent leur croissance, parfois à très grande distance du point de stimulation. Des chercheurs de l'Inra, du CNRS et d'Aix-Marseille Université proposent que le signal qui induit cette réponse provienne d'un couplage hydro-mécanique entre la déformation du tissu et la pression de l'eau contenue dans le système vasculaire de la plante. Ces travaux ouvrent ainsi la voie à un nouveau mode de communication chez les plantes. Ils sont publiés en ligne dans la revue *PNAS* le 02 octobre 2017.

Vent, pression du sol... les plantes sont sans cesse soumises à des contraintes mécaniques extérieures auxquelles elles répondent en modifiant leur croissance. Ainsi, quand on fléchit une branche ou une tige, on observe habituellement un arrêt transitoire de la croissance longitudinale et une augmentation de la croissance en diamètre de la tige. Une des caractéristiques de cette réponse est qu'elle peut se produire rapidement et à très grande distance du point de stimulation, suggérant l'existence d'un signal rapide qui se propage dans l'ensemble de la plante. L'origine et la nature de ce signal restent cependant inconnues à ce jour. Des chercheurs de l'Inra, du CNRS et d'Aix-Marseille Université ont mis en évidence que ce signal pourrait être purement mécanique et basé sur la propagation d'une surpression hydraulique générée par la flexion de la plante.

DES BRANCHES D'ARBRE BIOMIMÉTIQUES POUR COMPRENDRE

Sur la base d'une stratégie biomimétique, les scientifiques ont conçu des branches d'arbre artificielles. Imitant les caractéristiques de base des tiges et branches naturelles, elles consistent en une poutre cylindrique percée de micro-canaux et remplie de liquide.

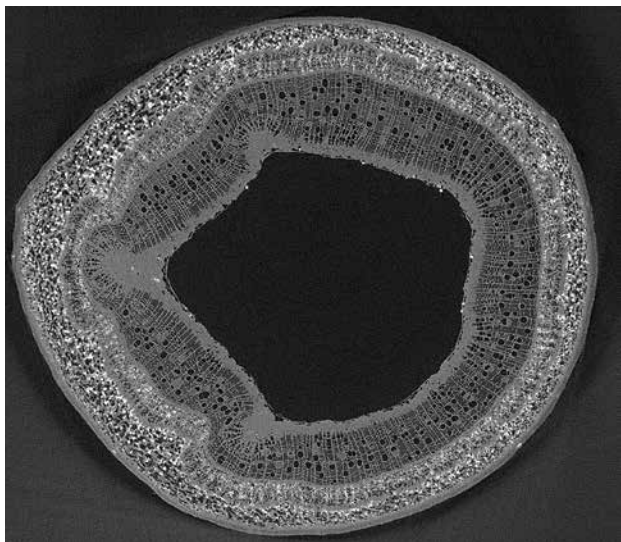
Quand la branche modèle est fléchie, les scientifiques ont constaté qu'une forte surpression hydraulique apparaît dans ses canaux, un phénomène qui n'est pas prédit par les modèles utilisés dans le domaine de la résistance des matériaux. La réponse est de plus non-linéaire : la pression hydraulique varie comme le carré de la déformation mécanique. Pour expliquer l'origine de cette surpression, les scientifiques ont

établi un modèle simple basé sur l'idée qu'une poutre poreuse en flexion tend à comprimer sa section transverse afin de minimiser l'énergie élastique totale. Ce modèle leur permet de prédire quantitativement cette réponse poroélastique non linéaire et d'identifier les paramètres physiques clés qui contrôlent l'apparition de cette pression.

DES BRANCHES D'ARBRE NATURELLES POUR CONFIRMER UN MÉCANISME UNIVERSEL

Les chercheurs de l'Inra, du CNRS et d'Aix-Marseille Université ont ensuite confronté les prédictions du modèle à des expériences sur des branches naturelles d'arbre. Trois espèces représentatives des différents types d'anatomie du bois rencontrés chez les arbres ont été étudiées : le pin sylvestre, le chêne vert et le peuplier blanc.

Comme dans le système biomimétique, la flexion de branches naturelles a généré une forte surpression hydraulique dans les canaux conducteurs. Plus encore, le modèle élaboré par les chercheurs permet de prédire l'ensemble des expériences réalisées sur les branches biomimétiques et les branches naturelles, illustrant l'universalité du mécanisme physique proposé.



Imagerie 3D par microtomographie à rayons x de la structure anatomique de bois de noyer.

Ces résultats constituent les bases physiques d'un nouveau mode de communication à longue distance chez les plantes, basé sur la propagation rapide de signaux hydrauliques. Ils appellent à explorer, pour mieux les comprendre, les réponses physiologiques des plantes à une surpression hydraulique et les mécanismes moléculaires sous-jacents.

RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

► Louf J.F., Guena, G., Badel E., Forterre Y. 2017. Universal poroelastic mechanism for hydraulic signals in biomimetic and natural branches. *Published online before print* October 2, 2017, doi: 10.1073/pnas.1707675114. PNAS October 2, 2017

COMMENT LA LUMIÈRE ET LE VENT MODÈLENT LES ARBRES

Comprendre la forme des arbres... Pour atteindre cet objectif, un groupe de recherche interdisciplinaire de Centrale Marseille, de l'Inra, d'AgroParisTech, du CNRS, d'Aix-Marseille Université ¹, a mis au point un modèle original simulant l'évolution d'une forêt pendant plus de 200 000 ans. Les arbres qui poussent dans cette forêt virtuelle sont en compétition pour l'accès à la lumière, ajustent leur croissance en réponse au vent et sont soumis à des tempêtes qui peuvent casser leurs branches. Lumière et vent sélectionnent des formes fractales dont les invariants d'échelle* sont similaires à ceux observés par les écologues et les forestiers sur les arbres. L'action conjointe du vent et de la lumière peut ainsi expliquer comment la forme des arbres a émergé, au cours de l'évolution. Ces résultats sont publiés le 18 octobre 2017 dans *Nature Communications*.

Un groupe interdisciplinaire de chercheurs, associant des biomécaniciens et des écophysiologistes des arbres de l'Inra et d'AgroParisTech, des physiciens des systèmes complexes de l'École Centrale de Marseille et du CNRS, a entrepris le pari de simuler un monde virtuel où des arbres croissent, se reproduisent et meurent sur des périodes telles que l'on peut suivre leur évolution darwinienne. Ils ont ensuite utilisé ce modèle pour tester une hypothèse audacieuse : et si les lois décrivant la forme des arbres avaient pu émerger en réponse à la compétition pour la lumière et aux dangers liés au vent ?

UN ARBRE VIRTUEL À LA POINTE DES DERNIÈRES CONNAISSANCES

Les scientifiques ont utilisé les dernières connaissances sur les réponses des plantes à la lumière et au vent pour construire un modèle de développement d'arbre. Les arbres virtuels sont capables d'intercepter la lumière, de répartir les produits de la photosynthèse entre organes, d'initier des branches, mais aussi de produire des graines qui germent après être tombées. Surtout, le modèle inclut deux découvertes récentes : la localisation des nouvelles branches qui bourgeonnent dépend de la lumière reçue et la croissance en diamètre des branches est pilotée par la perception des déformations au vent, un phénomène appelé thigmomorphogénèse qui contrôle, pour une grande part, la production de bois sous nos climats. Le modèle incorpore également des connaissances en météorologie et en biomécanique afin de simuler la casse au vent lors de tempêtes. Ces processus ont été intégrés dans un modèle informatique innovant, permettant des calculs à haute performance.

¹ Les chercheurs de ce groupe interdisciplinaire appartiennent aux unités suivantes : « Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (IRPHE) » Aix-Marseille Université-CNRS-Centrale Marseille ; « Laboratoire de Recherches sur la Forêt et le Bois (LERFoB) » Inra-AgroParisTech ; et « Physique et physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant (PIAF) » Inra-Université Clermont-Auvergne.

DES ÎLES, DES GRAINES, LA SÉLECTION NATURELLE ... ET DES MILLIERS D'HEURES DE CALCUL

Il ne restait plus qu'à semer des graines virtuelles et laisser la sélection naturelle faire son œuvre. Mais comment prendre en compte la variabilité génétique ? Tous les processus de l'arbre virtuel dépendent de paramètres quantitatifs décrivant la sensibilité à la lumière, au vent ou les priorités concernant la distribution des produits de la photosynthèse. Ces paramètres peuvent être interprétés comme des gènes de l'arbre. Il suffit alors d'imaginer que leurs valeurs peuvent varier, de génération en génération, par des mutations génétiques aléatoires. L'évolution est ensuite simulée sur une île virtuelle, baignée de soleil et de vent. Pourquoi une île ? Parce qu'on peut supposer qu'elle est isolée et ne reçoit pas de graine ou de pollen d'autres endroits. Et aussi parce que les études d'écologie évolutive ont montré que les îles assuraient une sélection rapide.

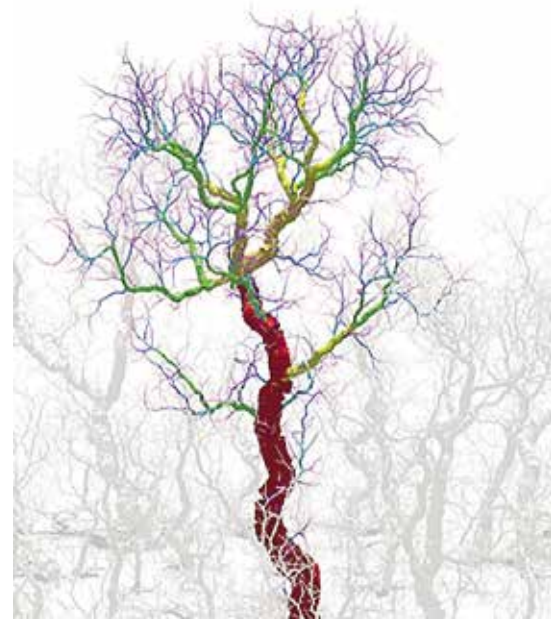
Ainsi, le programme informatique, appelé MechaTree, permet d'ensemencer des centaines d'îles virtuelles avec des graines dont les paramètres-gènes sont aléatoires. Les arbres germent, poussent, une forêt dense se développe. Les individus moins favorablement pourvus génétiquement disparaissent (c'est l'auto-éclaircie), les autres se reproduisent plus ou moins, c'est la sélection naturelle (virtuelle ici !). Puis les graines germent à nouveau, certaines espèces dominent l'île, d'autres disparaissent parfois.

Des milliers d'heures de calcul plus tard, représentant près de 200 000 ans de la vie d'une forêt, les chercheurs ont pu étudier les arbres des espèces survivantes. Et là, heureuse découverte : ces forêts et ces arbres présentaient toutes les lois d'échelles observées sur les arbres* : la loi d'auto-éclaircie, la dimension fractale, les allométries de taille avec le diamètre et même... la fameuse loi de Léonard de Vinci !

UNE SÉLECTION NATURELLE PAR LE COUPLE VENT-LUMIÈRE... MAIS PAS SEULEMENT

Qu'en conclure sur la sélection de la forme des arbres ? Le modèle développé permet de préciser les rôles joués par la lumière et le vent. Il apparaît que la transparence du feuillage et la compétition pour la lumière sont les premiers déterminants de la dimension fractale de l'arbre. De son côté, la réponse au vent, la thigmomorphogénèse, contrôle l'évolution du diamètre des branches.

Selon les chercheurs, d'autres facteurs ont pu jouer dans la sélection naturelle, comme le transport hydraulique de sève. Il est même probable qu'en fonction de l'environnement où ont évolué les espèces, c'est la conduction de la sève ou la résistance au vent qui a exercé la plus grande pression sélective. Cette étude a cependant démontré que le couple lumière-vent joue un rôle crucial dans la forme des arbres. Cette découverte change la donne en écologie forestière, mais elle change aussi nos représentations de ce qu'est un arbre et de ce qui a fait les arbres actuels !



© C. Eloy - Centrale Marseille

* LES INVARIANTS D'ÉCHELLE CHEZ LES ARBRES

Les arbres appartiennent à des groupes phyllogénétiques variés et il semble que le port arborescent ait été inventé plusieurs fois au cours de l'évolution. Quelles sont les caractéristiques de forme communes aux arbres actuels ? Et comment ces caractéristiques ont-elles émergé ? Ces questions ont traversé les âges.

Léonard de Vinci (c. 1478 - 1518), déjà, avait remarqué que, dans un arbre, la somme des sections des branches portées par un tronc est égale à la section de ce dernier. Plus tard avec l'avènement des **fractales**, on a pu montrer que les arbres se structuraient de manière auto-similaire, avec une dimension fractale de l'ordre de 2.5. Dans le même temps, forestiers et écologues repéraient des **lois d'échelle dites allométriques** au sein des populations arborées. Ces lois relient, par exemple, la masse moyenne des individus et le nombre d'individus par hectare (loi d'auto-éclaircie) ou la hauteur de l'arbre et le diamètre de son tronc. On parle ici d'allométrie quand deux quantités, x et y , sont reliées par une loi de puissance du type $y = kx^a$. Enfin, au niveau de l'arbre, on pouvait observer des **lois de défilement du diamètre** assez largement partagées.

Mais qu'est ce qui pouvait expliquer toutes ces lois empiriques ? Jusque-là, l'explication la plus communément admise était que la forme des arbres résulte de deux lois : **une loi de maximisation de la performance hydraulique** dans la conduction de la sève des racines vers les feuilles, et **une loi de portée mécanique maximale** leur évitant de s'effondrer sous leur propre poids (flambage). Mais cette explication a des faiblesses. Tout d'abord elle est statique : comment les arbres s'y prennent-ils pour satisfaire ces lois au cours de leur croissance ? On ne peut le dire. Par ailleurs, elle ne dit rien sur la façon dont l'évolution a pu sélectionner ces fonctions optimales. Enfin, elle néglige deux facteurs tout aussi cruciaux que la conduction d'eau ou le flambage pour les plantes terrestres : la compétition pour la lumière et la résistance au vent. Ce sont ces différents aspects que cette nouvelle étude vient éclaircir.

RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

► Christophe Eloy, Meriem Fournier, André Lacointe & Bruno Moullia. Wind loads and competition for light sculpt trees into self-similar structures, *Nature Communications* doi:10.1038/s41467-017-00995-6



4

AU CŒUR DES INTERACTIONS ENTRE CHAMPIGNONS ET ARBRES FORESTIERS

Qu'il s'agisse de champignons ou de bactéries, ces micro-organismes interagissent avec les arbres. Et ces interactions sont primordiales dans les cycles biogéochimiques, comme celui du carbone, contribuant au bon fonctionnement et à la durabilité des écosystèmes forestiers.

Les chercheurs de l'Inra s'intéressent tout particulièrement au fonctionnement des symbioses « mycorhiziennes » entre les champignons (comme les truffes ou les cèpes) et les arbres (chênes ou peupliers). Leurs travaux impliquent des approches pluridisciplinaires allant de l'écologie microbienne à la bioinformatique, en passant par la génomique et la métagénomique. Une attention particulière est portée aux truffes pour mettre en avant la licence de savoir-faire Inra sur la production de plants mycorhizés signée en 1972, plus vieille licence de l'Institut encore active !

Par ailleurs, les scientifiques étudient les champignons pathogènes forestiers et les maladies émergentes qu'ils transmettent aux peuplements forestiers en France et en Europe. Rouille du peuplier, chalarose du frêne, oïdium du chêne... les chercheurs visent à déterminer comment ces champignons pathogènes s'adaptent à leur hôte pour anticiper leur propagation et prévenir leurs effets.

LES CHAMPIGNONS, PARTIE INTÉGRANTE DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

Les champignons constituent un groupe au sein du règne vivant distinct de ceux des animaux et des végétaux. Ce sont des eucaryotes unicellulaires (levures) ou pluricellulaires (champignons filamenteux) ; cependant, ils sont hétérotrophes pour le carbone comme les animaux mais ont une paroi cellulaire et se nourrissent par absorption comme les végétaux.

Le nombre d'espèces de champignons est considérable (de 1 à 5 millions selon les estimations) et ils occupent pratiquement tous les types d'écosystèmes terrestres et toutes les niches écologiques. Leur abondance et leur diversité sont particulièrement grandes dans les écosystèmes forestiers où ils sont représentés dans le sol, l'humus et sur ou dans pratiquement tous les organes des plantes.

On peut distinguer trois grands groupes fonctionnels de champignons correspondant à différentes stratégies d'acquisition du carbone :

- › les décomposeurs ou saprophytes (qui utilisent le carbone de la nécromasse, en particulier des macromolécules végétales telles que la lignine et la cellulose) ;
- › les parasites ou pathogènes (qui détournent à leur profit le carbone d'un végétal autotrophe au détriment de ce dernier, pouvant même entraîner la mort de l'hôte) ;
- › les symbiotes (qui s'alimentent en carbone en contact avec les arbres mais ils sont bénéfiques à ceux-ci, souvent même obligatoires à sa survie et à son développement complet) ; les plus connus des symbiotes sont les champignons mycorhiziens qui colonisent les racines et transfèrent aux plantes l'eau et les éléments minéraux du sol.



RÔLE DES CHAMPIGNONS DANS LA PRODUCTION FORESTIÈRE

Les champignons du premier groupe (les décomposeurs) sont certes indirectement importants pour la productivité à long terme des peuplements forestiers, puisqu'ils assurent la libération des éléments minéraux de la nécromasse et leur recyclage dans la biomasse, permettant le maintien de la fertilité et la pérennité de la production primaire, essentiellement assurée par les arbres.

Ceux des deux autres groupes (les champignons symbiotiques et pathogènes) sont cependant plus directement responsables à court ou moyen terme de l'état du peuplement puisqu'ils vivent en interaction avec les arbres vivants et affectent positivement ou négativement leur métabolisme. Par exemple, les champignons mycorhiziens (symbiotes), associés aux racines et tissant un vaste réseau mycélien dans le sol, sont indispensables aux arbres pour assurer l'absorption de l'eau et des éléments minéraux. Il a été démontré que les différentes espèces de champignons mycorhiziens contribuaient à la nutrition des arbres par des mécanismes divers et qu'elles étaient complémentaires. À l'inverse, les champignons pathogènes envahissent les tissus vivants des arbres (racines, tiges, écorce, tissus conducteurs, branches ou feuilles), détruisant une partie du système absorbant ou conducteur, ou réduisant la masse de substances de réserve ; ceci peut conduire à une perte de production de bois, au dépérissement et à la mort de l'arbre.

Il existe plusieurs types de symbiose mycorhizienne, avec les arbres on parle de symbiose ectomycorhizienne. Les champignons ectomycorhiziens sont des Ascomycètes (truffes) et des Basidiomycètes (chanterelles, amanites, bolets). Le mycélium de ces champignons, constitué d'hyphes microscopiques, s'enroule autour des racines fines pour former un manteau et il progresse entre les cellules de l'épiderme des racines hôtes mais ne pénètre jamais dans les cellules vivantes, au contraire des parasites. La symbiose mutualiste contractée par ces champignons se concrétise chez la plupart des arbres par la formation de tissus spécialisés, l'ectomycorhize, qui est constituée :

- › des hyphes extramatrixielles se propageant dans le milieu extérieur et forme un réseau souterrain abondant et assumant un rôle essentiel d'exploration et d'absorption,
- › des hyphes étroitement agglomérés autour de la racine fine et constituant le manchon mycélien ou manteau gainant la racine,
- › les hyphes du réseau de Hartig qui s'insinuent entre les cellules du cortex racinaire sans jamais pénétrer dans les cellules de l'hôte ; c'est à leur niveau que se déroulent les échanges de nutriments entre les deux partenaires - un commerce équitable -.

Les chercheurs de l'Inra ont montré qu'il y a avait un échange de molécules entre le champignon et l'arbre permettant de préparer l'installation de la symbiose. Ces mécanismes impliquent des molécules fongiques particulières, appelées effecteurs. Les champignons symbiotiques ne sont pas les seuls à échanger des molécules avec les arbres, il en est de même pour les

champignons pathogènes. Toutefois la problématique est différente, pour les champignons symbiotiques il faut que la plante « perçoive » que le champignon ne lui veut pas de mal, pour les champignons pathogènes il faut que la plante reconnaisse le champignon comme un agresseur afin de déclencher ces mécanismes de défense. Ces dialogues impliquent des gènes dont l'étude est au cœur des activités de l'unité « Interactions Arbres-Microorganismes » à Nancy.

Que la forêt soit vierge, aménagée ou même très artificialisée (plantation d'essences exotiques à croissance rapide), l'interdépendance est donc très étroite entre les arbres et les champignons. Tout changement survenant dans les facteurs extérieurs naturels ou anthropiques (climat, pollution, sylviculture) retentit par conséquent sur des équilibres plus ou moins instables. Du point de vue du gestionnaire, le résultat final essentiel est la production de bois dans un laps de temps donné, tout en maintenant la pérennité du système de production.

Les connaissances actuelles sur les relations forêt-champignons montrent donc clairement que tout projet à long terme de gestion durable des ressources forestières doit se préoccuper de la stabilité des équilibres biologiques interactifs, dans lesquels les champignons sont des partenaires importants. Il existe aussi désormais des outils de diagnostic et, dans certains cas, des moyens d'intervention pour contrôler et maîtriser les relations arbre-champignon. Leur mise en œuvre est l'un des défis de la nouvelle sylviculture.

CONTACT

Claude Murat

claude.murat@inra.fr / 03 83 39 40 41

Unité mixte de recherche « Interactions Arbres/Micro-organismes » (Inra-Université de Lorraine)

Département scientifique Écologie des forêts, prairies et milieux Aquatiques

Centre Inra Grand Est-Nancy

LE GÉNOME DES TRUFFES RÉVÈLE LE SECRET DE LA FABRICATION DE LEURS PARFUMS

Un consortium international coordonné par l'Inra, et impliquant notamment le Joint Genome Institute (JGI), le CEA-Génomscope, l'Université de Turin, l'Université de Lorraine et le CNRS, a séquencé et décrypté le génome de plusieurs truffes réputées dont la truffe blanche d'Alba, la truffe de Bourgogne et la truffe du désert. Cette avancée permet de mieux comprendre la symbiose entre arbres et champignons, dont le rôle écologique est considérable, mais surtout les mécanismes impliqués dans la formation des truffes et la fabrication de leurs fameux parfums. Ces travaux sont publiés le 12 novembre 2018 dans la revue *Nature Ecology and Evolution*.

En 2010, l'équipe de microbiologistes de l'Inra de Nancy est parvenue à « décrypter » le génome de la Truffe noire du Périgord, avec la collaboration du Centre national de séquençage du Génomscope et des collègues italiens. Pas moins de huit années auront été nécessaires afin d'achever le travail considérable publié dans *Nature Ecology and Evolution*. En séquençant le génome des autres truffes réputées (truffe blanche d'Alba, truffe de Bourgogne, truffe du désert) le consortium international a réussi à identifier les gènes indispensables à la formation de la symbiose et des corps fructifères - remarquablement bien conservés chez toutes les truffes séquencées. L'exploitation et la comparaison de ces génomes permet de mieux connaître la biologie et l'écologie des différents types de truffes. Ces ressources génomiques ont permis d'élucider quelques-unes des facettes de ces champignons mystérieux, comme leur mode de reproduction ou leur façon de synthétiser leurs cocktails d'arômes, complexes et caractéristiques.

- OPTIMISER
- LA TRUFFICULTURE

De nos jours, qu'elle soit du Périgord ou encore d'Alba, la truffe est rare et donc chère : la noire du Périgord (*Tuber melanosporum*) se vend environ 1 000 euros le kilo aux particuliers et la blanche d'Alba (*Tuber Magnatum*), plus de 3 000 euros le kilo. À ce prix, le fruit de la symbiose entre le champignon et l'arbre est surtout apprécié par de rares amateurs et les grands chefs étoilés. La maîtrise de tous les paramètres biologiques et écologiques, qui rendent possibles dans la nature une symbiose efficace et une fructification régulière et importante, reste encore hors de portée. C'est pourquoi trufficulteurs et scientifiques cherchent ensemble à optimiser la trufficulture.



PRÈS DE 50 MOLÉCULES AROMATIQUES CONSTITUENT LE PARFUM DE CHAQUE ESPÈCE DE TRUFFE

Le parfum des truffes est composé d'un cocktail complexe de composés organiques volatils. Leur libération remplit une fonction biologique intimement liée à la reproduction, qui assure la dissémination des différentes espèces de truffes depuis près de 150 millions d'années. Les truffes produisent leurs corps fructifères (ou fructifications) sous la surface du sol, à l'abri des regards et de la sécheresse. Cependant, leur parfum puissant attire sangliers et rongeurs qui les déterrent pour les déguster et ainsi propager leurs spores aux quatre coins des truffières. Décortiquer la fabrication des parfums s'est donc retrouvé tout naturellement au cœur des recherches sur les truffes. Près d'une cinquantaine de molécules constituent le parfum typique de chacune des différentes espèces de truffes. Les gènes codant les enzymes impliquées dans la synthèse de ces parfums se sont révélés particulièrement actifs dans les différentes truffes étudiées, permettant ainsi la production de molécules aromatiques très particulières, dont de nombreux composés soufrés. La composition du parfum caractéristique de chacune des truffes - forte odeur d'humus et de musc pour la Truffe noire du Périgord ou camembert à l'ail pour la fameuse truffe blanche d'Alba - est le résultat de l'activité différentielle des gènes au sein des fructifications matures. Plus surprenant, les chercheurs ont découvert que les bactéries et les levures présentes en abondance sur la surface, mais aussi au cœur de la fructification, pourraient modifier la composition du cocktail aromatique libéré. Comme dans les fromages, bactéries et champignons semblent travailler de concert pour fabriquer les fragrances complexes qui séduiront les gourmets.

Les chercheurs du consortium exploitent maintenant ces ressources génomiques pour mieux comprendre l'interaction symbiotique, entre les truffes et les arbres, ainsi que la formation des fructifications. Elles sont également utilisées pour développer de nouveaux outils visant à mieux comprendre l'écologie des truffières comme c'est le cas dans le projet CulturTruf.

RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

› Pezizomycetes genomes reveal the molecular basis of ectomycorrhizal truffle lifestyle, *Nature Ecology & evolution*, 12 novembre 2018, DOI <http://dx.doi.org/10.1038/s41559-018-0710-4>.

CONTACT

Claude Murat

claude.murat@inra.fr / 03 83 39 40 41
Unité mixte de recherche « Interactions Arbres/Micro-organismes » (Inra-Université de Lorraine)
Département scientifique Écologie des forêts, prairies et milieux Aquatiques
Centre Inra Grand Est-Nancy



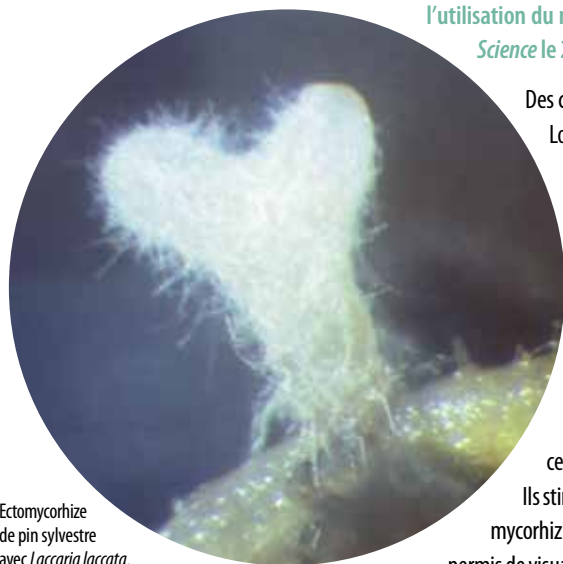
● UN PROGRAMME ● D'EXPÉRIMENTATION NATIONAL

CulturTruf est un projet de recherche participative soutenu par FranceAgrimer et piloté par l'Inra. Co-construit avec les organismes professionnels, la Fédération française de la truffe (FFT) et le Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes (CTIFL), il associe les régions trufficoles françaises. L'objectif du programme est de déterminer l'effet des techniques culturales sur le régime hydrique des truffières et le cycle biologique des truffes. Concrètement, il s'agit de fournir des outils aux professionnels. En effet, le suivi du régime hydrique du sol est indispensable pour optimiser l'irrigation des truffières. Car si la truffe a besoin d'eau, les excès peuvent être tout aussi néfastes. De même, posséder un indicateur mesurant les besoins en eau permet d'en raisonner l'apport et évite un gaspillage de la ressource. Or, cette technologie est onéreuse ; c'est pourquoi les chercheurs testent des équipements (sondes) moins chers. Ils estiment qu'ils pourront proposer très prochainement des outils à des prix abordables à la profession pour suivre le régime hydrique des truffières.

La première tâche du projet qui consistait à identifier et instrumenter des sites expérimentaux a été effectuée en 2016. 13 sites ont été sélectionnés et installés : 11 pour la truffe noire du Périgord (*T. melanosporum*), 1 pour la truffe d'été (*T. aestivum*), 1 pour la truffe de Bourgogne (*T. aestivum* var. *uncinatum*). Deux autres tâches sont également engagées avec le début des relevés du régime hydrique des sols des truffières et le suivi du mycélium de truffe dans le sol pour des analyses ADN. Ces outils ADN ont été mis au point dans le cadre d'un projet financé par le Labex ARBRE (ClimaTruf) qui a aidé à la mise en place de CulturTruf. Les résultats sont communiqués à la profession via les conseillers régionaux en trufficulture au fur et à mesure de leurs acquisitions, pour qu'ils puissent les restituer rapidement aux trufficulteurs.

SYMBIOSES ENTRE PLANTES, CHAMPIGNONS ET BACTÉRIES : UN ÉCLAIRAGE ORIGINAL SUR CES ALLIANCES ANCESTRALES

Des chercheurs de l'Inra, associant les universités de Lorraine et de Toulouse, et le CNRS, ont reconstitué l'histoire évolutive des symbioses mycorhiziennes et fixatrices d'azote. Leur travail de synthèse apporte un éclairage original sur les symbioses à bénéfice mutuel et sur les mécanismes moléculaires et cellulaires impliqués dans la colonisation des racines des plantes par les microorganismes. Une meilleure compréhension de ces mécanismes et de leur modulation par différents facteurs, tels que le génotype de la plante ou le type de sol, devrait faciliter l'utilisation du microbiote des plantes dans le cadre d'une agriculture durable. L'article est publié dans *Science* le 26 mai 2017.



Ectomycorhize de pin sylvestre avec *Laccaria laccata*.
Noter la forme bifide et la présence de mycélium frangeant.
Mycorhize jeune.

Des chercheurs des centres Inra de Grand-Est-Nancy et Occitanie-Toulouse associés aux universités de Lorraine et de Toulouse en collaboration avec le Laboratoire des interactions plantes-microorganismes (Inra/CNRS), publient le 26 mai 2017 un article de synthèse sur les symbioses mutualistes entre plantes et microorganismes, mettant en perspective leur évolution et les mécanismes moléculaires et cellulaires qui contrôlent leur développement. L'intérêt de cette analyse réside dans la comparaison de plusieurs symbioses emblématiques : la symbiose mycorhizienne à arbuscules, l'ectomycorhize et les symbioses fixatrices d'azote à rhizobiacées et à *Frankia*.

Depuis leur colonisation des continents à l'Ordovicien il y a plus de 450 millions d'années, les plantes sont en interaction constante avec un cortège complexe de microorganismes (le microbiote) que ce soit dans leurs tissus (endosphère) ou à leur surface (rhizosphère, phyllosphère). Une partie de ces microorganismes se singularise par leur capacité à établir une relation mutualiste avec les plantes. Ils stimulent ainsi la nutrition de leur plante-hôte. C'est notamment le cas des champignons mutualistes mycorhiziens et des bactéries symbiotiques fixatrices d'azote. L'analyse des fossiles de plantes n'a pas encore permis de visualiser les structures développées lors de la symbiose fixatrice d'azote par les bactéries. Au contraire, de nombreux fossiles de plantes primitives ont confirmé que les premières plantes terrestres étaient déjà associées aux champignons mycorhiziens, les Gloméromycètes. Nul doute que ces microorganismes symbiotiques ont contribué au succès de la colonisation des continents par les plantes en augmentant considérablement la capacité d'absorption des racines explorant les sols primitifs très pauvres en éléments nutritifs.

Les chercheurs discutent les grandes étapes de l'évolution des symbioses mutualistes et comparent les mécanismes impliqués dans la colonisation des plantes-hôtes. Bien qu'impliquant des bactéries ou des champignons, les mécanismes moléculaires et cellulaires déployés lors des premières étapes de colonisation de la plante-hôte sont très voisins. De façon surprenante, les signaux diffusibles à base de chitine et la cascade de signalisation de la symbiose mycorhizienne contractée entre les premières plantes terrestres et les champignons Gloméromycètes, il y a plus de 400 millions d'années, ont été recrutés par les bactéries formant des nodosités fixatrices d'azote avec les légumineuses. Sont également impliqués des modifications de la balance hormonale de la racine et divers mécanismes pour éviter le déclenchement de la défense immunitaire de la plante-hôte.

Les auteurs suggèrent que l'étude de ces symbioses mutualistes complexes pourrait permettre de mieux comprendre les interactions des plantes avec la multitude de microbes qu'elles hébergent. Cette meilleure compréhension des signaux et des mécanismes impliqués dans le développement symbiotique et leur modulation par différents facteurs (génotype de la plante, type de sol) devrait faciliter l'utilisation du microbiote des plantes dans le cadre d'une agriculture durable, par exemple en optimisant la croissance des plantes tout en diminuant l'apport d'engrais azotés et phosphatés dans les agrosystèmes et en favorisant la séquestration du carbone en forêt.

CONTACT

Francis Martin

francis.martin@inra.fr / 03 83 39 40 80
Recherches Avancées sur la Biologie de l'Arbre et les Écosystèmes Forestiers
Département scientifique Écologie des forêts, prairies et milieux Aquatiques
Centre Inra Grand Est-Nancy

RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

► Ancestral alliances: Plant mutualistic symbioses with fungi and bacteria.

By Francis M. Martin, Stéphane Uroz, David G. Barker. *Science* 26 mai 2017 - Vol. 356, Issue 6340 DOI: 10.1126/science.aad4501

UN CHAMPIGNON SYMBIOTIQUE FACILITE L'ADAPTATION DES ARBRES À LA SÉCHERESSE

Un consortium international, coordonné par l'Inra et l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) ¹ en Suisse, et impliquant notamment le CNRS, l'Université de Lorraine et Aix-Marseille Université, a décrypté le génome et le transcriptome de l'un des champignons symbiotiques le plus fréquemment associé aux arbres forestiers. Cette avancée permet de mieux comprendre l'évolution de la symbiose entre plantes et champignons mycorhiziens, et en particulier le rôle de ce champignon dans l'adaptation à la sécheresse des arbres. Les connaissances acquises sur ce génome devraient faciliter l'utilisation de la symbiose dans la gestion des forêts soumises à des épisodes de sécheresse de plus en plus fréquents. Le détail de ces résultats est publié dans l'édition avancée en ligne de *Nature Communications* du 7 septembre 2016.

Cenococcum geophilum est le champignon ectomycorhizien le plus fréquemment associé aux racines des arbres des forêts tempérées et boréales. Il est particulièrement abondant lors des sécheresses estivales et ses ectomycorhizes protègent les racines de la dessiccation.

Grâce à une collaboration étroite entre l'Inra et le WSL ², ainsi qu'au Joint Genome Institute (JGI) et à d'autres partenaires académiques, le génome et le transcriptome de ce champignon symbiotique sont désormais décryptés. Les gènes et leurs produits d'expression, des molécules à l'origine des protéines de l'organisme, ont été identifiés. Leur analyse, réalisée dans cette étude, apporte des informations nouvelles sur les mécanismes moléculaires nécessaires à la mise en place d'une symbiose mycorhizienne équilibrée profitant aux deux partenaires. En particulier, elle révèle que l'expression de plusieurs gènes codant des protéines membranaires formant des « pores » perméables aux molécules d'eau, les aquaporines, est fortement stimulée lors de l'interaction symbiotique. Cette induction est modulée lorsque la plante hôte est soumise à un stress hydrique. Ce mécanisme moléculaire original pourrait expliquer le rôle bénéfique de *Cenococcum* sur son hôte lors des périodes de forte sécheresse.

Comme ses cousins de la famille des Basidiomycètes, *Cenococcum geophilum* a perdu la plupart des enzymes permettant de dégrader la lignine et les polysaccharides, comme la cellulose, accumulés dans le sol et la paroi de la plante ; il dépend ainsi de sa plante-hôte pour subvenir à ses besoins en sucres et énergie. En contrepartie, il dispose d'un incroyable répertoire de gènes de communication et de signalisation utilisés afin de dialoguer avec ses différentes plantes hôtes.

Ces travaux s'inscrivent dans un programme ambitieux, mené en collaboration étroite avec le Joint Genome Institute (JGI), visant à caractériser le génome de plus de 1 000 champignons afin de mieux comprendre le rôle de ces microbes dans les écosystèmes terrestres soumis à des contraintes climatiques de plus en plus fréquentes.

¹ Le consortium international, coordonné par l'Inra et l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) implique le Joint Genome Institute (JGI), le CBS-KNAW Fungal Biodiversity Centre, l'Université de Göttingen, le CNRS, et les Universités de Lorraine, d'Aix-Marseille, de l'Orégon et de Brême.

² L'Inra et le WSL sont partenaires au sein du réseau NFZ.forestnet



Les racines du peuplier avec le mycélium noir et les mycorhizes formées par *Cenococcum*.

CONTACT

Francis Martin

francis.martin@inra.fr / 03 83 39 40 80
Recherches Avancées sur la Biologie de l'Arbre et les Écosystèmes Forestiers
Département scientifique Écologie des forêts, prairies et milieux Aquatiques
Centre Inra Grand Est-Nancy

RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

► Peter, M. et al. Ectomycorrhizal ecology is imprinted in the genome of the dominant symbiotic fungus *Cenococcum geophilum*. *Nature Communications* 7:12662 doi: 10.1038/ncomms12662 (2016).

LA ROUILLE DU PEUPLIER, CHAMPIGNON PATHOGENE MODELE

La maladie de la rouille foliaire du peuplier, causée par le champignon basidiomycète *Melampsora larici-populina*, entraîne des dégâts conséquents en plantations. La seule méthode de lutte économiquement et écologiquement acceptable est la sélection de variétés de peupliers présentant une résistance durable à la rouille, ce qui constitue un objectif majeur pour plusieurs laboratoires dans le monde, dont des équipes Inra. Le choix d'une stratégie de sélection pour la résistance durable nécessite une meilleure compréhension de l'interaction entre le champignon parasite et son hôte. Dans ce contexte, les chercheurs de l'Inra étudient la capacité de ce champignon à infecter son hôte afin de comprendre les processus par lesquels il détourne les ressources de la plante et manipule son système immunitaire.

Avec près de 240 000 hectares de peupleraies, la France est le second producteur de peupliers dans le monde après la Chine et premier en Europe. 46 % de la récolte de bois de peuplier sont destinés à l'industrie des emballages légers et 20 % à la production du bois d'œuvre. La ressource en bois de peuplier est aujourd'hui fragilisée par plusieurs facteurs : la baisse des prix, les problèmes sanitaires et les changements climatiques.

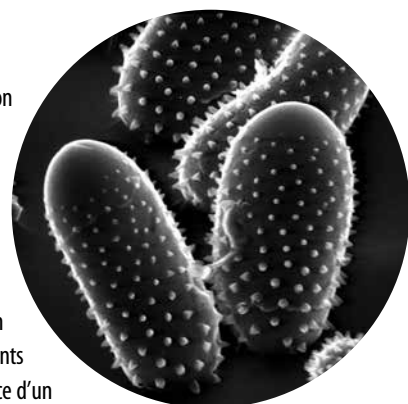
Principale maladie du peuplier, la rouille foliaire est provoquée par plusieurs espèces de champignons appartenant au genre *Melampsora*. En Europe, la principale espèce qui sévit est *Melampsora larici-populina*. Le nom de la maladie vient de la couleur orangée que prend le feuillage lors d'une infection forte par le champignon. En effet, l'agent pathogène produit des pustules orangées, appelées urédies, sur la face inférieure des feuilles. Ces urédies produisent des spores qui peuvent être disséminées parfois sur de longues distances. Conséquence de l'infection pour l'arbre : l'activité photosynthétique est réduite, les arbres perdent leurs feuilles précocément, voient leur croissance réduite et sont fragilisés. Ils sont en proie à d'autres attaques qui peuvent entraîner la mort des arbres.

Depuis les années 1950, des variétés de peupliers présentant des résistances complètes à *M. larici-populina* ont été plantés en Europe. Mais après quelques années de culture, le champignon pathogène a acquis de nouvelles virulences, ces résistances ont été contournées par le champignon pathogène et les arbres sont devenus sensibles. Dans les années 1990, est apparu le contournement du gène de résistance R7 et celui-ci a fortement impacté la populiculture (culture de peupliers). En l'espace de quelques décennies, l'agent de la rouille du peuplier a été capable de contourner les résistances complètes présentes chez tous les cultivars de peuplier utilisés en plantations et il apparaît urgent de mieux comprendre les bases génétiques de la maladie pour sélectionner des cultivars avec des résistances durables à la rouille.

SÉQUENÇAGE DU GÉNOME DE *MELAMPSORA LARICI-POPULINA*

Grâce au séquençage du génome de cet agent pathogène réalisé en collaboration avec le Joint Genome Institute (JGI, États-Unis), les scientifiques de l'UMR Interactions Arbres-Microorganismes ont décrit ses gènes et étudié plus précisément les fonctions liées aux capacités d'infection du champignon. Ils ont également recherché des fonctions spécifiques des rouilles fongiques, en comparant le génome de *Melampsora* à celui de la rouille noire du blé.

En 2011, leurs travaux ont ainsi révélé que *M. larici-populina* possède un génome de grande taille (110 Mégabases) marqué par la prolifération d'éléments transposables (45 % d'éléments répétés dans le génome) et par la présence d'un très grand nombre de gènes (16 399) comparé à d'autres champignons pathogènes. Par des approches de génomique comparative, incluant notamment le génome de la rouille noire du blé (collaboration avec le Broad Institute et l'USDA aux États-Unis), les chercheurs ont montré que plus de la moitié de ces gènes étaient spécifiques du champignon ou propre au groupe des Pucciniales, et que près de la moitié des gènes étaient organisés en familles multigéniques. Parmi ceux-ci, la présence de 1184 gènes codant des petites protéines sécrétées (PPS) qui représentent un important réservoir d'effecteurs de pathogénicité potentiels a été détectée. Un profil similaire est révélé pour la rouille noire du blé, toutefois, la plupart des gènes codant des PPS sont



Urédiospores de *Melampsora larici-populina* observées au microscope électronique à balayage.

propres à chacune des rouilles. Ceci indique une grande spécificité et reflète vraisemblablement la co-évolution des deux champignons avec leurs hôtes respectifs. L'annotation des gènes codant des PPS chez *M. larici-populina*, l'analyse détaillée de leur expression lors de l'interaction avec le peuplier et l'étude des patrons de sélection au sein de familles géniques nous ont permis de sélectionner un groupe restreint de gènes candidats pour étudier leur rôle dans le processus infectieux. D'autres fonctions en lien avec la pathogénicité sont marquées par des expansions notables en gènes chez les deux rouilles tels que des transporteurs d'acides aminés ou d'oligopeptides. Ces gènes sont fortement exprimés lors de la colonisation des tissus des hôtes respectifs, soulignant leur importance dans le processus de croissance biotrophe.

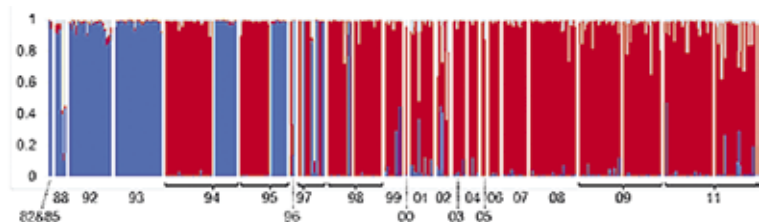
L'analyse fonctionnelle d'effecteurs sélectionnés par ces approches génomiques a permis de sélectionner des gènes d'avorulence candidats prometteurs, permettant de mieux comprendre les mécanismes moléculaires qui contrôlent le contournement des systèmes immunitaires du peuplier et le développement de la maladie. Une approche récente de génomique des populations a permis aux chercheurs de comparer le génome de 80 souches de *M. larici-populina* appartenant à plusieurs groupes génétiques. Ainsi, une étude d'association pangénomique (ou GWAS, *Genome-Wide Association Study*) leur a permis d'identifier une région génomique sur le chromosome 15 de *M. larici-populina* qui porterait le gène d'avorulence *Avr7*, responsable contournement du gène de résistance R7 du peuplier. Cette région est en cours d'analyse fonctionnelle et évolutive dans le cadre d'une thèse.

REINE ROUGE ET ROUILLE DU PEUPLIER

La théorie de la Reine Rouge prédit que les interactions entre espèces peuvent mener à une course aux armements, et les cas extrêmes à une extinction de groupe. Une étude rétrospective sur 25 ans portant sur plus de 600 isolats de *M. larici-populina* a permis d'examiner les changements de composition génétique des populations échantillonnées autour d'un évènement majeur de sélection lié au contournement de la résistance R7 largement déployée en populiculture dans les années 1980. En 2017, ces travaux ont révélé que les populations de rouille du peuplier ont subi un tel remaniement lors du contournement de la résistance R7 : la population préexistante (avorulente) s'est éteinte, totalement remplacée par la population virulente en quatre ans seulement.

Les isolats collectés avant l'évènement de contournement forment un groupe génétique distinct (en bleu dans l'illustration) qui s'éteint très rapidement après l'émergence du groupe génétique formé par les nouveaux individus virulents (en rouge). À noter que l'émergence du nouveau groupe génétique coïncide effectivement avec la date présumée du contournement.

Cette étude de structuration des populations montre l'impact de la sélection sur l'histoire démographique de ce pathogène. Mais ce n'est que le volet 'neutre' de cette histoire. À l'heure actuelle, les scientifiques cherchent à mettre en évidence l'étendue des balayages sélectifs en identifiant les régions du génome qui ont été le plus impactées par cet évènement.



HISTOGRAMME DES PROBABILITÉS D'ASSIGNATION INDIVIDUELLE. Chaque barre représente un individu. La longueur du segment coloré est proportionnelle à la probabilité d'appartenance à chaque groupe génétique (en rouge le groupe émergent après contournement, en bleu le groupe fossile qui s'éteint, en gris d'autres groupes mineurs). L'année d'échantillonnage est présentée en abscisse (une barre blanche sépare chaque échantillon temporel)

RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

- › Duplessis S, et al. (2011) Obligate biotrophy features unraveled by the genomic analysis of rust fungi. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 108:9166-9171.
- › Persoons A., Hayden K. J., Fabre B., Frey P., De Mita S., Tellier A., Halkett F. 2017. The escalatory Red Queen: Population extinction and replacement following arms race dynamics in poplar rust. *Molecular Ecology* 26: 1902-1918.

CONTACT

Pascal Frey

pascal.frey@inra.fr / 03 83 39 40 56
Unité mixte de recherche « Interactions Arbres/Micro-organismes » (Inra-Université de Lorraine)
Département scientifique Écologie des forêts, prairies et milieux Aquatiques
Centre Inra Grand Est-Nancy



147, rue de l'Université
75338 Paris Cedex 07
France



SERVICE DE PRESSE
Tél. +33(0)1 42 75 91 86
presse.inra.fr



FÉVRIER 2019