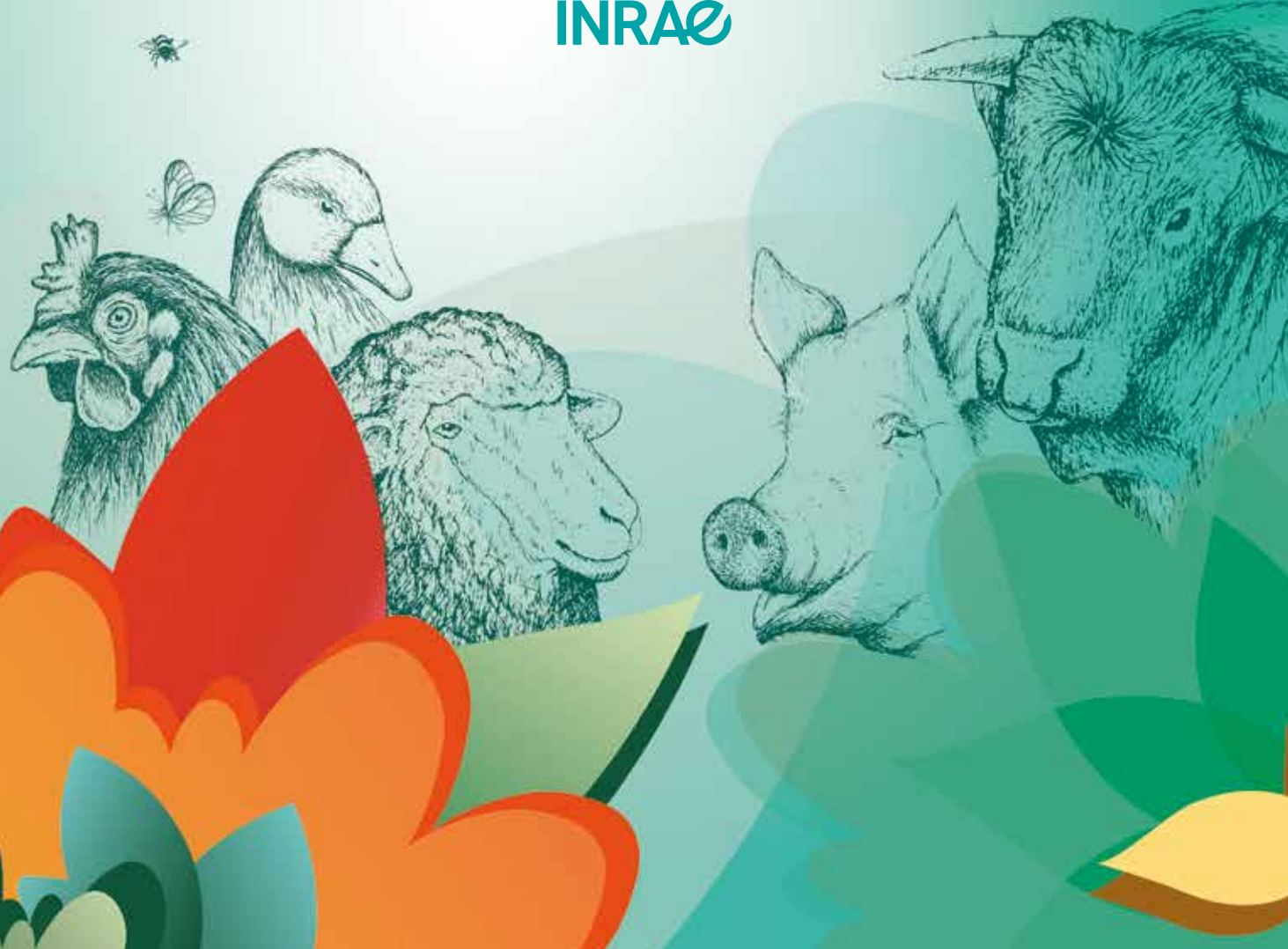


The background of the cover is a vibrant teal color. It is decorated with large, stylized floral shapes in red, orange, and yellow at the top and bottom corners. Small, detailed illustrations of insects, including butterflies and beetles, are scattered across the teal background. The title and logo are centered in the middle of the page.

LA VIE SECRÈTE DES PLANTES

INRAE

In the lower half of the cover, there are detailed line drawings of various farm animals. On the left, a rooster, a duck, and a sheep are shown. On the right, a pig and a cow are depicted. These animals are positioned as if they are looking out from behind a large, stylized flower that spans the bottom of the page.



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 INRAE 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.



<https://www.inrae.fr/actualites/plantes-sensibles-leur-environnement-capables-sy-adapter-mouvements>

Accueil → Toutes les actualités → Les plantes, sensibles à leur environnement et capables de s'y adapter en mouvements

Les plantes, sensibles à leur environnement et capables de s'y adapter en mouvements



DOSSIER DE PRESSE – 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 INRAE 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.

Publié le 14 mai 2020



© INRAE – R. Bastien / S. Douady / B. Mouliat

Sommaire

1. Vers quelles applications pour l'agriculture et la foresterie?
2. Le tour de force perceptif des plantes pour se maintenir à la verticale
3. Comment les plantes ressentent-elles si précisément la gravité?
4. Les végétaux ont le sens de la rectitude!
5. La sensori-motricité des plantes, leur perception d'elles-mêmes et leur sens de l'équilibre

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 disent 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.

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 INRAE 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.

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 Moulia. 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.



GRAVITÉ

MOTRICITÉ

ADAPTATION DES PLANTES

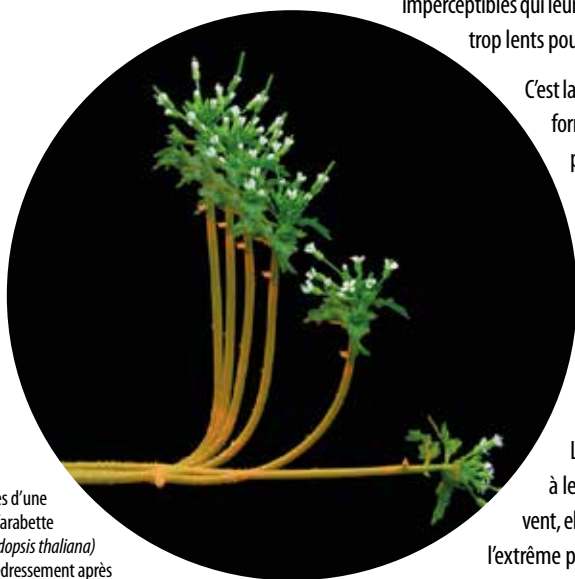
AGRICULTURE

FORESTERIE

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 continuellement 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 direct 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).

© INRAE - R. Bastien / S. Douady / B. Mouliat

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 INRAE 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 Mouliat. 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 FORESTERIE ?

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 d'INRAE, 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 sédimentent 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 « la tête qui tourne » ? C'est la question que s'est posé un groupe de chercheurs associant des mécanobiologistes d'INRAE 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)

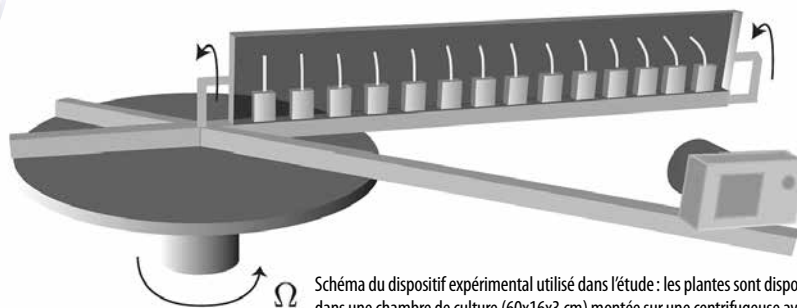
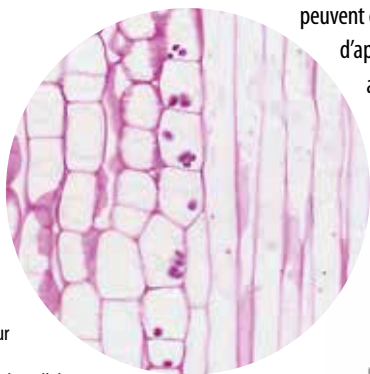


Schéma du dispositif expérimental utilisé dans l'étude : les plantes sont disposées dans une chambre de culture (60x16x3 cm) montée sur une centrifugeuse avec 2 axes de rotation sur laquelle un appareil photo est monté afin de filmer précisément le mouvement de redressement des plantes. La rotation de 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. © INRAE - H Chauvet, O Pouliquen, Y Forterre, V Legué, B Moulia

RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES

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

COMMENT LES PLANTES RESSENTENT-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, d'INRAE 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*.

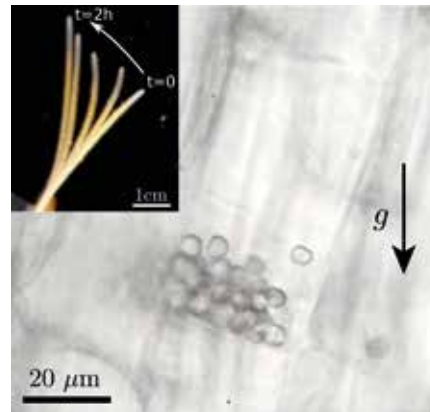
Si l'on penche une plante, celle-ci corrigera sa croissance pour pousser à nouveau à la verticale. Mais comment l'a-t-elle senti ? Grâce à des « inclinomètres » cellulaires : des cellules remplies de grains d'amidon microscopiques, les statolithes. La position du tas de grains dans les cellules indique 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.

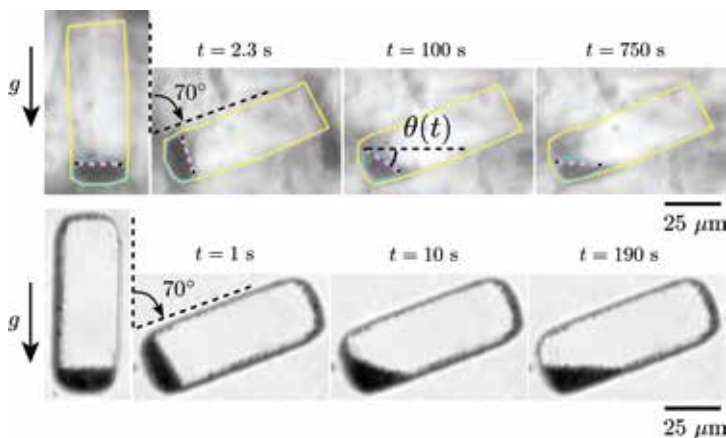
Des chercheurs de l'Institut universitaire des systèmes thermiques industriels (CNRS/Aix Marseille Université) et du laboratoire de Physique et physiologie intégratives de l'arbre en environnement fluctuant (INRAE/Université Clermont Auvergne) se sont donc associés pour résoudre ce paradoxe. Ils ont 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 Yoel 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 d'INRAE 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

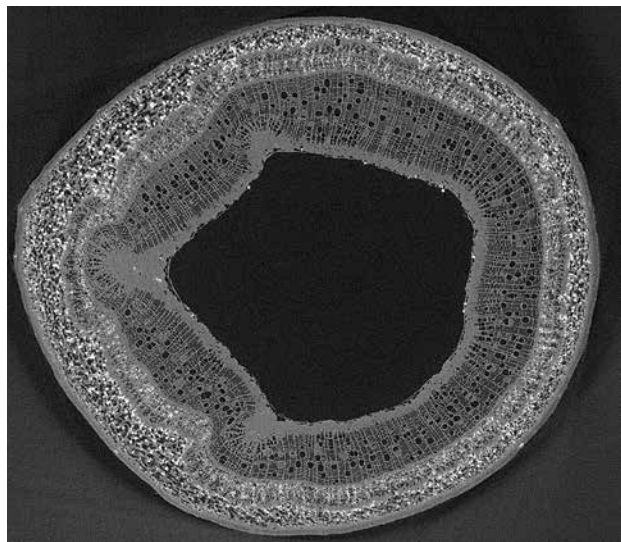
Dans la nature, les plantes sont soumises à des sollicitations mécaniques externes qui affectent leur croissance, parfois à très grande distance du point de stimulation. Des chercheurs d'INRAE, du CNRS et d'Aix-Marseille Université proposent que le signal qui induit cette réponse provienne d'un couplage 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 d'INRAE, 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



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

établi un modèle simple basé sur l'idée qu'une poutre poreuse en flexion tend à comprimer sa section transversale 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 d'INRAE, 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.

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, d'INRAE, 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 d'INRAE 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) » INRAE-AgroParisTech ; et « Physique et physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant (PIAF) » INRAE-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.

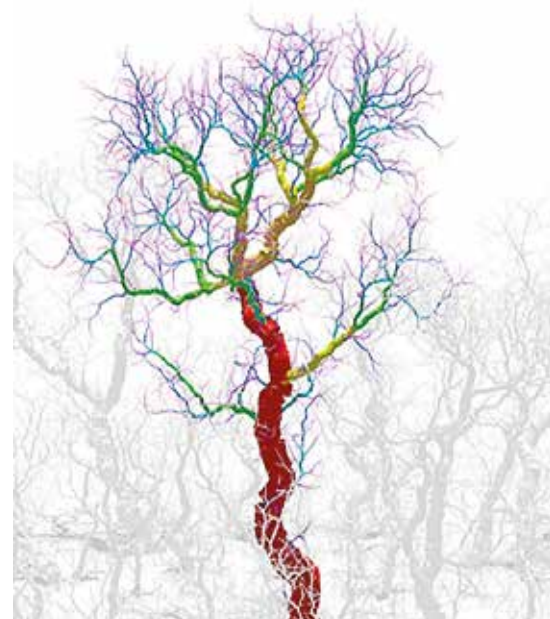
Ainsi, le programme informatique, appelé MechaTree, permet d'ensemencer des centaines d'îles virtuelles avec des graines dont les paramètres-gènes sont aléatoires. Les arbres germent, poussent, une forêt dense se développe. Les individus moins favorablement pourvus génétiquement disparaissent (c'est 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 ? Jusqu'alors, 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 Mouliat. Wind loads and competition for light sculpt trees into self-similar structures, *Nature Communications* doi:10.1038/s41467-017-00995-6



Centre-siège Paris-Antony
Service Presse
Tél.: +33(0)1 42 75 91 86
presse.inrae.fr

Rejoignez-nous sur:



inrae.fr/presse

**Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE