

L'intelligence mathématique des arbres

Si Léonard de Vinci a établi que la croissance du tronc et des branches répond à des lois mathématiques, des chercheurs viennent d'en modéliser la cause principale : la forme des troncs évolue pour offrir une meilleure résistance au vent.

QUELLE QUE SOIT LEUR ESPÈCE, les arbres suivent... des lois mathématiques. La première d'entre elles est connue : grande ou petite, massive ou maigrelette, leur forme obéit aux structures fractales, modélisées en 1974 par le mathématicien Benoît Mandelbrot. Il s'agit d'« invariance d'échelle ». Ce qui signifie que quelle que soit l'échelle d'observation, la même forme est reproduite. L'exemple du chou-fleur est éloquent : un minuscule fragment de celui-ci est un chou-fleur entier en miniature. À la suite des travaux de Mandelbrot, les observateurs ont massivement repéré des fractales dans la nature : nuage, trait de côte, tracé des fleuves... présentent tous une structure fractale. Cependant le premier qui a eu l'intuition de cette invariance d'échelle est Léonard de Vinci au XVI^e siècle. « *La loi qu'il a établie s'énonce ainsi : la somme des sections de toutes les branches est égale à la section du tronc* », explique Christophe Eloy, chercheur à l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (Irphe, université d'Aix-Marseille, CNRS, Cen-

trale Marseille). Cinq cents ans après Léonard de Vinci et plus de deux décennies après Benoît Mandelbrot, on vient enfin d'en comprendre la raison. Le groupe de recherche interdisciplinaire de Centrale Marseille, de l'Inra, d'AgroParisTech, du CNRS et de l'université Aix-Marseille a mis au point un modèle numérique appelé MechaTree. Ses résultats viennent d'être publiés dans *Nature Communications*. Et, contre toute attente, ils montrent que « *ce sont la lumière et, surtout, le vent qui dictent ces lois mathématiques* », affirment les auteurs. Ainsi ni l'essence, ni l'âge, ni la génétique de la plante ne sont des facteurs déterminants.

L'explication hydraulique a longtemps seule prévalu

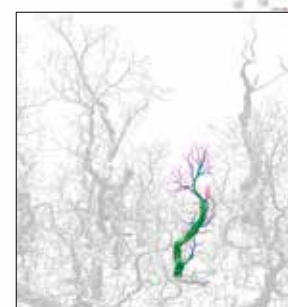
Sous l'ensemble des climats, ces « fractales forestières » sont présentes, hormis pour certaines espèces à la biologie très particulière qui semblent y échapper, comme le baobab. Restait à en expliquer les causes. Pendant des décennies, une hypothèse a prévalu : la forme et le comportement des arbres proviendraient



En observant les arbres pour mieux les reproduire, Léonard de Vinci découvre une relation constante entre la taille des branches et celle du tronc (ici l'un de ses croquis, XVI^e siècle).

des mécanismes hydrauliques permettant à la sève d'irriguer les tissus végétaux. L'eau pompée par l'intermédiaire des racines monte en effet jusqu'au feuillage où elle hydrate les cellules avant d'être transpirée. Les nervures des feuilles agissent à la manière d'un réseau capillaire. Ensemble ils forment un mécanisme censé assurer à la fois la climatisation des feuilles et leur capacité à produire des sucres par photosynthèse, et qui influencerait donc sur la façon dont le spécimen croît. Mais cette explication hydraulique n'était pas entièrement satisfaisante selon Bruno Moulia, chercheur à l'UMR Physique et physiologie intégratives de l'arbre en environnement fluctuant (Piaf, Inra, université de Clermont-Ferrand). « *Le système de vaisseaux est en effet présent uniquement sous l'écorce, dans les premiers millimètres de bois. Il ne représente que quelques "pourcent" du volume total de l'arbre et il est donc difficile d'imaginer que cela puisse jouer un rôle sur l'ensemble de sa morphologie* », poursuit l'expert.

C'est en travaillant sur le vent, sa spécialité, que l'UMR Piaf est parvenue à une autre conclusion. « *En comparant un végétal soumis à l'effet du vent à un autre de la même espèce mis à l'abri, nous avons déjà constaté que le premier se rigidifie davantage et produit des branches et des troncs*



Le modèle numérique MechaTree a simulé la croissance du végétal, la formation de la cellulose et la résistance du bois.

plus épais », note Bruno Moulia. Un phénomène nommé thigmomorphogenèse dont l'impact est particulièrement spectaculaire sur la forme des troncs puisqu'il conduit à un élargissement de la base pour mieux résister aux efforts portant sur la ramure. Un peu à l'instar du fonctionnement d'un pied-de-biche. « *C'est d'ailleurs pour avoir la meilleure résistance au vent que Gustave Eiffel a donné cet empattement à sa tour parisienne* », s'amuse Christophe Eloy. La thigmomorphogenèse pouvait-elle expliquer l'obser-

vation de Léonard de Vinci et la forme en fractale ? se sont alors demandé les scientifiques. L'hypothèse, hélas ! est difficile à vérifier dans la nature, la croissance des arbres étant beaucoup trop lente. En 2011, Christophe Eloy s'était déjà servi de la modélisation. « *C'est en utilisant deux modèles de biomécanique prédisant la probabilité qu'une branche se casse sous l'effet du vent que nous avons alors montré que la meilleure résistance au vent conduit... à la loi de Léonard de Vinci* », s'enthousiasme-t-il. Mais les chercheurs ont poussé

l'exercice plus loin pour explorer les limites de leur modèle numérique : ils l'ont confronté à d'autres « constantes que les forestiers connaissent bien », sourit Bruno Moulia. Il en va ainsi de la loi dite du défilement, qui veut que le diamètre des branches se réduise quand on s'éloigne de la base du tronc, ou du lien établi entre le diamètre d'un tronc, la hauteur du fût et le volume du bois et du houppier (l'ensemble des branches sommitales). À ces rapports propres à chaque individu se superposent d'étranges

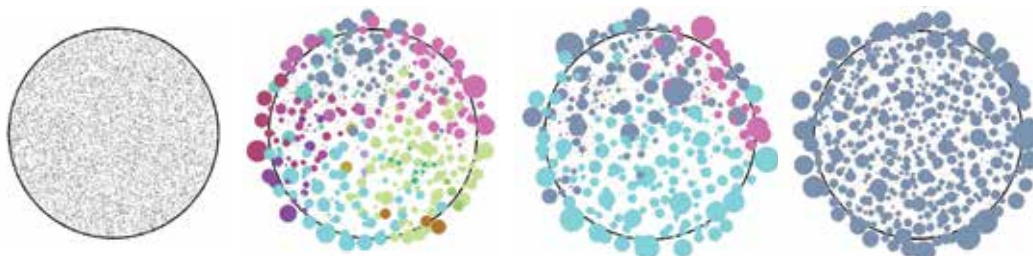


« Un végétal soumis à l'effet du vent se rigidifie davantage et produit des troncs et des branches plus épais »

Bruno Moulia, chercheur à l'UMR Physique et physiologie intégratives de l'arbre en environnement fluctuant, Inra, université de Clermont-Ferrand

Modéliser l'évolution d'une forêt

Sur une île fictive, plate, à l'ensoleillement constant et balayée par les vents, 200 000 ans au total de croissance forestière ont été reproduits.



An 0. Les arbres sont jeunes et la biodiversité est maximale.

2000 ans. La règle d'auto-éclaircie est à l'œuvre : le nombre d'arbres diminue, leur taille s'accroît.

5570 ans. La compétition s'exacerbe entre les espèces les mieux adaptées.

10 000 ans. Selon les processus darwiniens, une seule espèce parvient à coloniser tout l'espace.

► relations régissant la forêt dans son ensemble comme la loi dite d'auto-éclaircie. « Ce phénomène, là encore bien connu des exploitants, voit la densité en arbrisseaux d'un secteur en reforestation s'amenuiser naturellement au cours du temps du fait que la plupart des repousses meurent au profit de quelques individus qui deviendront adultes », expose Bruno Moulia. Cette fois, la simulation a permis de reproduire la façon dont des milliers d'arbres poussent, entrent en com-

POUR EN SAVOIR PLUS

► Modélisation de la croissance d'une forêt en vidéo : sciav.fr/851arbres

pétition pour l'accès à la lumière, répondent à la perception du vent et se reproduisent. « Nous avons alimenté les modèles avec les résultats les plus récents et avons fait varier les stratégies de croissance et de réponse au vent. »

Les chercheurs ont ensuite créé des îles virtuelles, plates, à l'ensoleillement constant et soumises à des tempêtes, qu'ils ontensemencées — toujours virtuellement — de graines de diverses espèces. « Le milieu îlien nous a permis de

nous extraire des influences extérieures comme l'apport de graines d'espèces différentes », justifie Bruno Moulia. Ce sont ainsi des dizaines de situations différentes de compétition et d'évolution génétique qui ont pu être testées sur 200 000 ans, ce qui représente environ 500 générations d'arbres. « Nous avons alors constaté que, dans ces forêts virtuelles, la compétition pour l'accès à la lumière et la résistance aux conditions climatiques conduit à l'élimination de toutes les espèces au profit d'une seule, explique le chercheur. Nous avons eu aussi la confirmation que la lumière et le vent sont bien des facteurs essentiels pour expliquer la forme des arbres, puisqu'on retrouve toujours les invariants que l'on constate dans les forêts. »

Ainsi vent et lumière règneraient en maîtres absolus sur la forêt ? Les chercheurs se gardent bien de cet absolutisme. L'hypothèse de la circulation hydraulique de la sève étant toujours défendue. Mais une chose est sûre : l'influence du soleil et du vent l'emporte largement. Ces travaux devraient en tout cas déboucher sur des applications pratiques en gestion forestière. « La santé des arbres est principalement vue aujourd'hui sous le prisme de la disponibilité en eau et de l'ensoleillement, précise Bruno Moulia. Il faudra désormais y ajouter l'influence majeure du vent sur la croissance des troncs et la qualité du bois ». ■ **Loïc Chauveau**

ADAPTATION

Prendre de la hauteur, un défi pour les plantes

Lutter contre la gravité, le rayonnement solaire, le vent... L'adaptation des plantes au milieu terrestre a été pour le moins très compliquée. « Les organismes marins sont portés par l'eau, si bien qu'ils n'ont pas besoin de se rigidifier. Ainsi, les algues sont restées souples, explique Bruno Moulia, chercheur à l'Inra (université de Clermont-Ferrand). En revanche, sur terre, il faut se renforcer pour se porter, ce qui a pour conséquence d'augmenter la prise au vent en lui fournissant un bras de levier. » Les premières plantes terrestres, apparues

voici 475 millions d'années, sont ainsi plaquées au sol. Ce n'est qu'il y a 430 millions d'années que des tissus lignifiés — associant le réseau vasculaire conduisant la sève et les fibres rigides — apparaissent, permettant aux tiges de se dresser. Dès lors, les plantes vont prendre de la hauteur pour avoir un accès privilégié à la lumière et pouvoir disperser leurs graines plus facilement. *Armoricaphyton chateaupannense*, un fossile de plante découvert dans le Massif armoricain, est ainsi le plus vieux bois du monde jamais trouvé (-407 millions

d'années). Les arbres vont ensuite connaître un succès fulgurant pour coloniser le monde au carbonifère (-350 à -300 millions d'années). Ces gymnospermes (les résineux actuels) céderont ensuite l'essentiel de la place aux angiospermes, les plantes à fleurs apparues il y a environ 120 millions d'années. Les 60 065 espèces d'arbres recensées en 2017 sur la planète par le Botanic Gardens Conservation International britannique représentent aujourd'hui 20 % de toutes les plantes à fleurs.