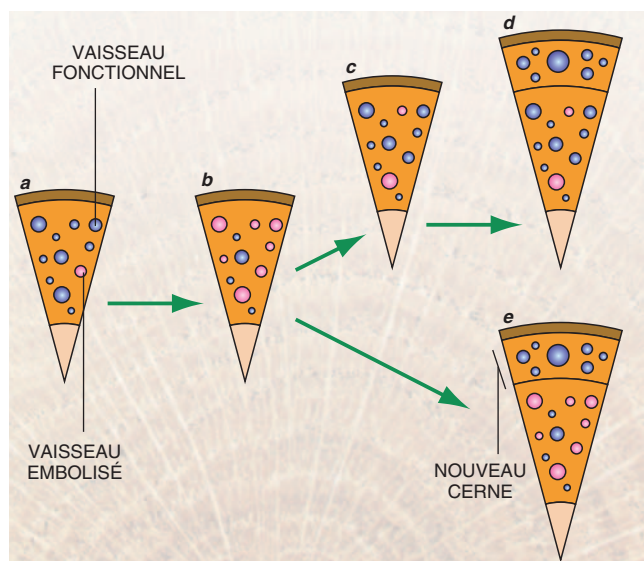




7. L'EMBOLE HIVERNALE résulte de la succession de périodes de gel et de dégel qui rendent des vaisseaux fonctionnels (a, en bleu) impropres au passage de la sève (b, en rose). Elle se résorbe de deux façons selon les essences. Chez le hêtre et le noyer, la sève est mise sous pression soit grâce à l'hydrolyse de l'amidon des branches, soit grâce à la poussée racinaire : les bulles se résorbent (c, le nombre de vaisseaux fonctionnels a augmenté) peu à peu avant la croissance d'un nouveau cerne (d) qui peut se former après l'apparition des feuilles. En revanche, chez le chêne, il n'y a pas de résorption de l'embolie, aussi, c'est surtout la croissance qui permet d'alimenter les nouvelles pousses.

cavitation. Ainsi, les stomates sont les garants de l'intégrité de l'appareil vasculaire des arbres.

Les courbes de vulnérabilité indiquent les gammes de tensions pour lesquelles les échanges gazeux sont assurés. Aujourd'hui, on dispose de telles courbes pour plusieurs dizaines d'espèces et on constate des disparités en fonction des zones d'habitat de ces essences. Certaines sont très vulnérables, tels les peupliers, les saules et les noyers, avec des seuils de cavitation compris entre 0 et -20×10^5 pascals. D'autres sont résistantes, tels les chênes méditerranéens, les cèdres et un pin corse, avec des seuils de cavitation inférieurs à -40×10^5 pascals. Entre les deux, on trouve un grand nombre d'espèces vivant en régions tempérées, tels le hêtre, le frêne et des conifères, tel le pin sylvestre.

De l'importance de l'architecture

Par ailleurs, la vulnérabilité varie selon les différents axes d'un même arbre, en fonction de leur diamètre ou de leur nature. Enfin, une autre source de sensibilité à l'embolie est liée aux conditions de croissance : chez le hêtre, les branches qui se développent à la lumière sont notablement moins vulnérables que celles qui poussent à l'ombre, sans doute parce que leurs vaisseaux sont soit plus nombreux, soit plus larges, soit plus longs ; chez le frêne, la sensibilité des pétioles varie selon leur position dans le houppier (le sommet de l'arbre) ou selon l'âge des branches.

La croissance du diamètre participe également au contrôle de l'embolie (voir la figure 7). À chaque printemps, un tissu périphérique, nommé cambium, ajoute un cerne et, par conséquent, de nouveaux vaisseaux alimentant les pousses de l'année. Chez les espèces qui ne réparent pas l'embolie estivale, cette croissance n'est efficace que lorsqu'elle a lieu avant le débourrement, c'est-à-dire

l'éclosion des bourgeons. Dans ces conditions, les nouvelles feuilles sont correctement alimentées une fois la période de gel révolue. Les conduits embolisés le restent et sont parfois envahis par des thylls, des excroissances cellulaires des vaisseaux qui les bouchent définitivement.

L'étude de l'architecture hydraulique a aussi mis en évidence les relations entre l'état hydrique d'un arbre, mesuré par la tension de la sève brute, et sa croissance. L'enjeu est d'importance, car il concerne le déterminisme de la ramification et donc l'acquisition de la forme de la partie aérienne de l'arbre. Le fonctionnement physiologique des plantes vasculaires est perturbé dès que l'état hydrique diminue de plus de 15 à 25 pour cent de sa valeur optimale : bien plus que la photosynthèse, c'est la croissance, c'est-à-dire l'augmentation des dimensions d'un organe, qui est sensible au dessèchement.

Chez le hêtre, on a montré que plus la résistance des éléments conducteurs qui alimentent les bourgeons est faible (la conductivité est grande), plus le nombre d'ébauches foliaires dans les bourgeons est élevé. Les variations de la résistance hydraulique résultent des différences de diamètre des vaisseaux et de leur nombre. Or, chez le hêtre, le nombre d'ébauches dans le bourgeon détermine non seulement le nombre de feuilles de la pousse, mais également sa morphologie : lorsqu'il y a moins de quatre ébauches, la pousse est courte et ne se ramifie pas l'année suivante ; quand il y a plus de quatre ébauches, la pousse est longue et se ramifie. Au cours d'une année, la mise en place des ébauches foliaires est fonction du diamètre des pousses : plus il est grand, plus il y a d'ébauches. L'année suivante, la croissance en longueur et la ramification des pousses dépendent du nombre d'ébauches. Ainsi, en partie grâce à ses effets sur l'appareil vasculaire alimentant les bourgeons, les pousses et le nombre de feuilles mises en place une année dépendent des conditions de croissance de l'année précédente.

Les arbres ont une architecture hydraulique fondée sur deux propriétés de l'appareil conducteur : d'une part, sa vulnérabilité à l'embolie et sa conductivité hydraulique, d'autre part, la répartition de ces conductivités dans l'arbre. Leur étude a élucidé nombre de mécanismes, jusqu'alors inconnus, grâce auxquels on comprendra mieux l'évolution des caractéristiques au cours du vieillissement des arbres. Enfin, les botanistes mesurent désormais l'importance des périodes automnale et hivernale pendant lesquelles les arbres n'ont pas de feuilles et, par conséquent, ne transpirent pas. Bien qu'il ne se passe rien de visible, les nombreuses relations entre l'état de l'eau dans le système vasculaire, la physiologie et le développement de l'arbre font de cette période une étape clef indispensable au bon développement de la végétation quand la belle saison est venue.

Pierre CRUIZIAT, Hervé COCHARD et Thierry AMÉGLIO travaillent à l'unité mixte de recherches INRA-Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand « Physiologie intégrée de l'arbre fruitier et forestier ».

Pierre CRUIZIAT et al, *Hydraulic architecture of trees : main concepts and results*, in *Annals of forest science*, 2002.

De la graine à la plante, Bibliothèque scientifique Belin-Pour la Science, 2002.

M. TYREE et M. ZIMMERMANN, *Xylem structure and the ascent of sap*, Springer series in wood science, 2002.

Les échelles quantiques

THIERRY GIAMARCHI • EDMOND ORIGNAC • DIDIER POILBLANC

Composés hybrides, à mi-chemin entre les fils unidimensionnels et les conducteurs à deux ou trois dimensions, les échelles quantiques ont des propriétés électriques radicalement nouvelles.

La physique quantique s'est révélée indispensable non seulement pour comprendre les phénomènes atomiques ou subatomiques, mais aussi pour expliquer nombre de phénomènes macroscopiques, tels le ferromagnétisme, la supraconductivité ou l'effet Hall quantique. Tous ces phénomènes résultent d'une combinaison entre, d'une part, les interactions électriques des électrons et des ions chargés qui constituent les solides, et, d'autre part, des effets purement quantiques irréductibles à une description classique.

La description complète d'un objet sur la base de ces interactions est, *a priori*, inenvisageable, car le nombre de particules dans un échantillon macroscopique est gigantesque (de l'ordre de 10^{23}) et, même si les équations de base qui régissent le système étudié sont bien connues, le temps nécessaire pour les résoudre sur un ordinateur excède de plusieurs ordres de grandeur l'âge de l'Univers. Lorsque la mécanique quantique s'en mêle, la complexité du problème est encore augmentée par l'impossibilité de connaître en même temps la vitesse et la position de chaque particule (principe d'indétermination de Heisenberg). Enfin, le comportement collectif d'un très grand nombre d'électrons donne lieu, comme nous allons le voir, à des phénomènes radicalement nouveaux, qui ne peuvent être déduits de l'étude d'un petit nombre de particules en interaction.

Heureusement, une description aussi complète n'est généralement pas nécessaire pour connaître les propriétés d'un corps à l'équilibre thermodynamique. Ainsi, à la fin du XIX^e siècle, Ludwig Boltzmann décrit de façon satisfaisante la physique des gaz parfaits ou dilués en introduisant l'usage des probabilités en physique, notamment pour décrire la position et la vitesse des particules. Par la suite, cette approche statistique a été généralisée par Josiah Gibbs qui exprima, pour un corps à la température T , la probabilité d'occupation de la configuration d'énergie E (proportionnelle à $\exp(E/kT)$ où k est une constante) sous une forme aisément transposable à la mécanique quantique. En physique des solides, il existe une simplification supplémentaire due au fait que l'on étudie des systèmes à basse température, et par conséquent, que l'on peut se contenter de considérer leur état fondamental (l'état de plus basse énergie) et les premiers états excités au-dessus du fondamental.

Comme nous le verrons, il résulte de ces méthodes que le comportement des électrons dans un conducteur de dimension égale à deux ou trois est très différent de celui des électrons contraints à se déplacer le long d'une direction unique. Au cours des dernières années les chimistes ont su synthétiser des matériaux constitués d'un petit nombre de chaînes d'atomes reliées par des ponts, les échelles, qui permettaient, pensaient les théoriciens, d'appréhender la structure des conducteurs bi ou tridimensionnels en partant de la limite unidimensionnelle qu'ils comprenaient bien. Or, de façon tout à fait inattendue, ces échelles quantiques se sont révélées dotées de propriétés très originales.

Gaz et liquides d'électrons

Dans un échantillon solide, les électrons se comportent comme un gaz ou une « mer » de particules chargées dont la structure détermine les propriétés de conduction du solide. Pour l'étudier plus en détail, rappelons qu'en mécanique quantique, on distingue deux classes de particules : les bosons (par exemple, les photons) et les fermions (par exemple, les électrons). Les bosons sont de véritables moutons de Panurge : la probabilité qu'un boson aille dans un état donné est proportionnelle au nombre de bosons qui l'occupent déjà. Au contraire, les fermions font figure de misanthropes : il est impossible de placer deux fermions dans le même état quantique (c'est le principe d'exclusion de Pauli). Les électrons, les protons et les neutrons ainsi que toute particule formée d'un nombre

1. LES ÉCHELLES QUANTIQUES sont des composés constitués de chaînes d'atomes – « les montants » – reliées par des ponts – « les barreaux ». Elles sont dotées de propriétés originales. Le composé de formule SrCu_2O_3 (*en haut*), un réseau cristallin constitué d'ions strontium Sr^{2+} (*en rouge*), cuivre Cu^{2+} (*en bleu*) et oxygène O^{2-} (*en turquoise*), est formé de plans d'ions strontium séparant les plans d'ions cuivre et oxygène (Cu_2O_3) qui contiennent les échelles (*en haut et à droite*). Ces échelles sont isolantes. Au contraire, les échelles du composé $\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ (*en bas*), sont supraconductrices sous certaines conditions. Cette fois, il y a trois types de plans : les plans d'ions strontium, des plans d'ions cuivre et oxygène, mais aussi des plans constitués de chaînes d'oxyde de cuivre (inactives pour le transport électronique). On sait synthétiser des échelles à un nombre n quelconque de montants, des composés de formule générale $\text{Sr}_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{2n+1}$.