



menterait son énergie superficielle d'une quantité égale au double du produit de la tension superficielle par la section de la colonne. Autrement dit, pour fractionner la colonne du liquide, il faudrait exercer une force de traction supérieure aux forces de cohésion entre les molécules situées de part et d'autre de la surface de séparation. La sève peut monter si haut parce qu'elle supporte les contraintes de traction de quelques atmosphères, imposées par la transpiration foliaire (plusieurs centaines d'atmosphères sont nécessaires pour rompre une colonne d'eau).

Dans une certaine mesure, le liquide se comporte comme un solide dont la résistance à la traction est très grande : le Soleil tire un fil de sève solide des racines jusqu'aux feuilles. La sève n'est donc pas poussée par le bas, mais bien tirée vers le haut. Seulement, la sève n'est pas un solide et elle subit des tensions qui peuvent créer des bulles, néfastes à sa bonne circulation.

Au voisinage des racines, la pression de la sève est proche de la pression atmosphérique. À mesure que l'on s'élève, la tension due à l'évaporation fait que la pression de la sève diminue jusqu'à - 4 atmosphères dans les canaux des feuilles d'un arbre dont la hauteur dépasse 50 mètres, alors que la pression qui s'exerce sur les feuilles est de une atmosphère. On tire tant sur les molécules du liquide qu'elles s'éloignent et peuvent devenir gazeuses. Ainsi, la baisse de pression peut faire bouillir la sève liquide : c'est la cavitation. Ce phénomène de cavitation fait apparaître une microbulle qui, envahissant une fraction appréciable du conduit, arrête l'ascension. L'arbre subit une « embolie ». Les arbres mettent en œuvre des moyens variés pour circonvenir cette difficulté. Pour la plupart des espèces, l'embolie est très localisée et, soit les vaisseaux où la sève ne circule plus redeviennent fonctionnels, soit de nouveaux tubes conducteurs formés au printemps sont utilisés.

mètre des conduits et de la viscosité de la sève. On obtient des vitesses de l'ordre de quelques mètres par heure. Encore plus bas, pour pénétrer dans les racines, l'eau doit traverser la paroi des cellules des racines dont l'épaisseur est d'environ dix nanomètres. Cette diffusion, relativement lente, se fait à des vitesses de l'ordre de 0,04 millimètre par heure. Or, les quantités d'eau qui traversent les racines, le tronc et les feuilles sont identiques, car le débit se conserve. Comme le débit est le produit de la vitesse par la surface, plus la vitesse est faible, plus la surface doit être importante. Ainsi, pour conserver le débit, la surface des feuilles doit être environ 2 500 fois supérieure à celle du tronc et les racines doivent avoir une surface dix fois plus grande encore. En regardant un arbre, il faut donc imaginer que son réseau de racines est bien plus développé que son feuillage visible ! Dans les racines, la plus grande partie de cette surface résulte de la présence d'innombrables radicelles.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

S. Delrot, Les sèves et leur circulation, in Dossier Pour la Science, De la graine à la plante, janvier 2000.

A. Mineyev, Why do trees grow so tall, but not taller?, in Quantum, p. 4, janvier / février 1994.

M.H. Zimmermann, How sap moves in trees, in Scientific American, p. 132, mars 1963.

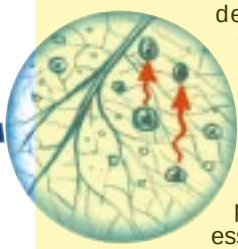
La pression osmotique de la sève des érables vaut environ 2 atmosphères et permettrait à la sève de s'élever d'à peu près 21 mètres. C'est encore insuffisant, mais la pression osmotique contribue à la montée printanière de la sève, lorsque la sève des racines est concentrée en matières nutritives produites lors de l'été précédent.

LES FEUILLES SUENT

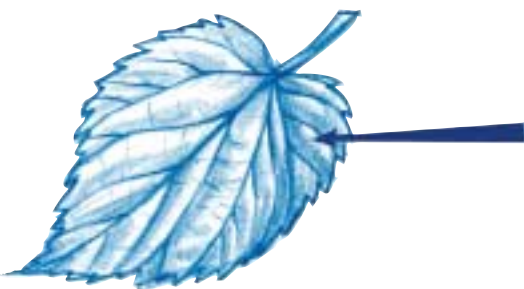
La solution à notre problème provient de ce que la circulation est ouverte : l'eau peut sortir de l'arbre. Le moteur qui fait monter la sève est le Soleil. Le courant de sève circule des racines les plus fines jusqu'aux capillaires des feuilles, où plus de 90 pour cent de l'eau de la sève s'évapore. Ainsi, une forêt d'un hectare évapore entre 3 000 à 4 000 tonnes d'eau par an. Cette évaporation assure la régulation thermique de la plante (l'évaporation refroidit), mais aussi la circulation de la sève.

Grâce à la capillarité, l'eau qui s'évapore par les pores de la feuille est remplacée par celle qui est amenée par la sève située plus bas. Cette évaporation tire du liquide vers le haut, car la colonne, ininterrompue depuis les racines, se déplace en bloc. Le fractionnement d'une colonne de liquide en deux parties aug-

À quelle vitesse monte la sève ? L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau provient du rayonnement solaire. On



calcule ainsi une vitesse de la sève dans les feuilles de 0,4 millimètre par heure, directement proportionnelle au flux solaire. Plus bas, dans le tronc, la propagation dépend essentiellement du dia-



L'ADN au microscope

DENIS MICHEL • ÉRIC LE CAM

La microscopie à force atomique permet l'exploration du matériel génétique.

L'ADN est une molécule dont la longueur est supérieure à un mètre : comment tient-elle dans le noyau, qui mesure dix micromètres (dix millièmes de mètre) de diamètre ? Les biologistes savent que des protéines rassemblent la molécule et qu'un des états le plus condensés de l'ADN correspond à son organisation en chromosomes,

au moment de la division cellulaire. L'étude des divers états de compaction de l'ADN est difficile. On utilise classiquement plusieurs sortes de microscopie (optique, électronique) afin de couvrir une large gamme de grossissements ; chaque microscopie impose des préparations spéciales. Aujourd'hui la microscopie à force atomique permet l'analyse

aux différentes échelles dans la continuité et sans coloration spécifique. De surcroît, les échantillons d'ADN peuvent être étudiés directement en solution, ce qu'aucune autre technique ne permet de faire à l'échelle de l'ADN.

Inventée en 1986, la microscopie à force atomique utilise une pointe très fine (l'extrémité a un diamètre de quelques nanomètres, ou milliardièmes de mètres) que l'on fait vibrer au-dessus de la surface explorée. Les forces interatomiques perturbent le mouvement de vibration de la pointe ; en détectant ces perturbations, alors qu'on déplace la pointe au-dessus de toute la zone explorée, on obtient des images, de l'échelle submillimétrique jusqu'à celle du nanomètre tout en conservant la même sensibilité sur la hauteur des objets (jusqu'à 0,01 nanomètre).

