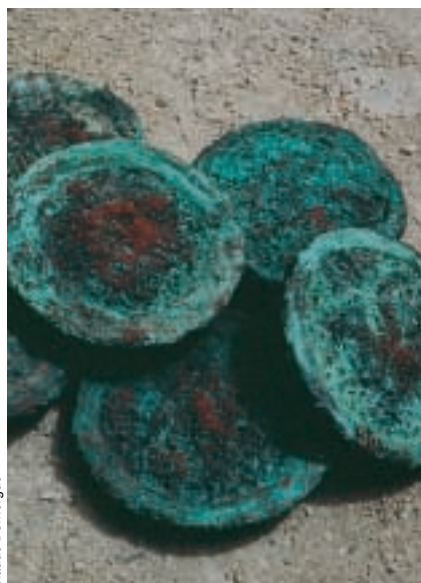
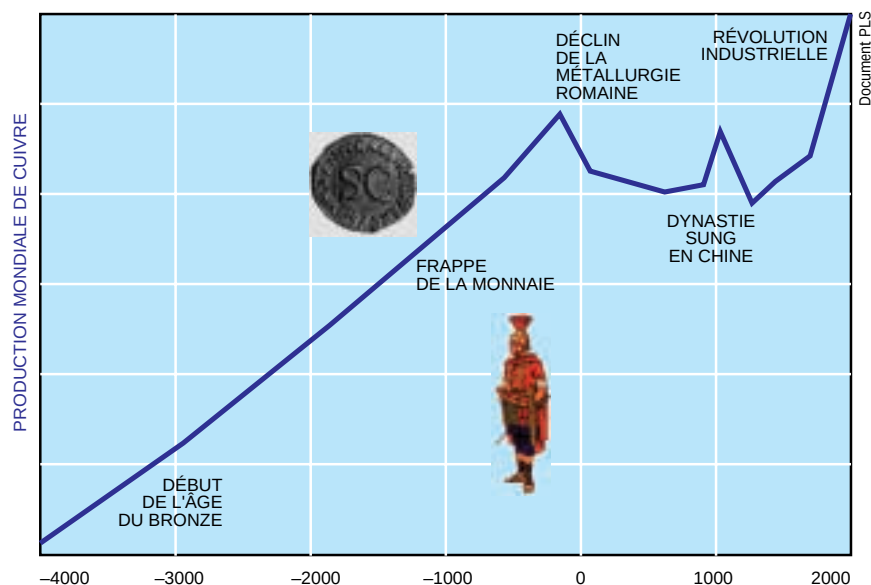




6. LA PRODUCTION de cuivre (courbe à droite) a commencé il y a plus de 6 000 ans. Elle a culminé une première fois à l'apogée de l'Empire romain (les lingots de gauche datent de cette époque).



Un deuxième maximum est observé à l'époque de la dynastie Sung, en Chine. La production actuelle est proche de neuf millions de tonnes par an.

thyle et le plomb diéthylo, dans les neiges du Groenland déposées lors de ces décennies : ces molécules n'existant pas à l'état naturel dans l'environnement, elles constituent des traceurs de la pollution par les additifs de l'essence. Absentes de la neige et de la glace déposées avant les années 1920, elles sont présentes dans les couches déposées à partir des années 1930.

De surcroît, l'étude de la composition isotopique du plomb déposé au Groenland a permis d'identifier l'origine géographique de ce plomb, par comparaison avec les « signatures isotopiques » du plomb émis dans les différentes zones sources de l'hémisphère Nord : pour ces études, on détermine par exemple l'abondance relative du plomb 206 et du plomb 207 dans le plomb émis dans les diverses régions du Globe, et on la compare aux abondances isotopiques effectivement observées dans les neiges du Groenland.

Ces analyses ont montré qu'au début des années 1970, les deux tiers du plomb déposé au Groenland central provenaient des seuls États-Unis ; à la fin des années 1980, les États-Unis n'étaient plus responsables que du quart des retombées, par suite de la très rapide baisse de l'utilisation des additifs dans ce pays. Les trois quarts du plomb provenaient alors d'Europe, où la baisse de l'utilisation des additifs au plomb a été plus tardive.

Les seuls autres métaux pour lesquels on dispose de suffisamment de

données fiables pour les deux derniers siècles sont le zinc, le cadmium et le cuivre. Les concentrations de ces trois métaux ont fortement augmenté jusqu'aux années 1960-1970, puis elles ont légèrement diminué au cours des deux dernières décennies. Les valeurs atteintes pendant les années 1960-1970 sont huit fois supérieures aux valeurs naturelles pour le cadmium, et cinq fois supérieures aux valeurs naturelles pour le zinc et le cuivre.

Toutefois la chronologie des changements diffère selon les métaux. Pour le zinc, la croissance des concentrations semble avoir été progressive à partir

des années 1770, alors que, pour le cadmium, elle n'aurait commencé qu'à partir des années 1850.

L'augmentation des concentrations jusqu'aux années 1960-1970 résulte sans aucun doute de l'augmentation des émissions atmosphériques de ces métaux liées à la production des métaux non ferreux, à la sidérurgie, à la combustion du bois et des combustibles fossiles et à l'incinération des ordures. La décroissance observée au cours des deux dernières décennies illustre les effets bénéfiques des mesures de réduction des émissions adoptées dans de nombreux pays industrialisés.

Claude BOUTRON, professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble (Institut universitaire de France), travaille au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement du CNRS.

J.O. NRIAGU, *Occupational Exposure to Lead in Ancient Times*, in *Sci. Tot. Environ.*, vol. 31, pp. 105-116, 1983.

J.O. NRIAGU et J.M. PACYNA, *Quantitative Assessment of Worldwide Contamination of Air, Water and Soils by Trace Metals*, in *Nature*, vol. 323, pp. 134-139, 1988.

K.J.R. ROSMAN, W. CHISHOLM, C.F. BOUTRON, J.P. CANDELONE et U. GÖRLACH, *Isotopic Evidence for the Sources of Lead in Greenland Snows since the Late 1960s*, in *Nature*, vol. 362, pp. 333-335, 1993.

S. HONG, J.P. CANDELONE, C.C. PATTERSON et C.F. BOUTRON, *Greenland Ice Evidence of Hemispheric Lead Pollution*

two Millennia ago by Greek and Roman Civilizations, in *Science*, vol. 265, pp. 1841-1843, 1994.

J.P. CANDELONE, S. HONG, C. PEL-LONE et C.F. BOUTRON, *Post-industrial Revolution Changes in Large-scale Atmospheric Pollution of the Northern Hemisphere by Heavy Metals as Documented in Central Greenland Snow and Ice*, in *J. Geophys. Res.*, vol. 100, pp. 16605-16616, 1995.

C. F. BOUTRON, *Historical Reconstruction of the Earth's Past Atmospheric Environment from Greenland and Antarctic Snow and Ice Cores*, in *Environ. Rev.*, vol. 3, pp. 1-28, 1995.

S. HONG, J.P. CANDELONE, C.C. PATTERSON et C.F. BOUTRON, *History of Ancient Copper Smelting Pollution during Roman and Medieval Times Recorded in Greenland Ice*, in *Science*, vol. 272, pp. 246-249, 1996.

Les hormones végétales

ANTONIO GRANELL • JUAN CARBONELL

Les hormones végétales sont des messagers chimiques que les cellules utilisent pour moduler leur développement et s'adapter à un environnement auquel les plantes, immobiles, ne peuvent échapper.

Au cours de l'évolution, les cellules, initialement isolées, se sont associées pour former des complexes pluricellulaires ; ceux-ci, au fil du temps, ont constitué les organismes supérieurs. Les activités de ces derniers se sont réparties dans des tissus et des organes à la suite de modifications structurelles et de spécialisations des groupes de cellules.

Cette nouvelle structuration a créé un besoin, celui d'une croissance harmonieuse dans l'espace et dans le temps. L'activité cellulaire s'est organisée au sein de ces nouvelles structures, chaque cellule recevant des informations issues d'autres cellules et de l'environnement. Les molécules déclenchant des réactions dans les cellules réceptrices ont d'abord été identifiées dans le monde animal ; elles sont dénommées hormones, d'après le terme grec qui signifie «mettre en mouvement». Leur synthèse, leur dégradation ou la variation de leur concentration sont des signaux captés et interprétés par les cellules munies des récepteurs adaptés.

Grâce aux expériences réalisées entre 1926 et 1928 par F. Went, à Utrecht, portant sur l'effet de la lumière sur la croissance du coléoptile d'avoine, le terme hormone fut également appliqué aux molécules végétales (le coléoptile est le nom donné à la gaine qui, chez les plantes monocotylédones, entoure l'épicotyle de la graine, la partie qui donnera la tige). Went s'est posé la question : comment les extrémités des plantes qui croissent en présence de lumière deviennent-elles la partie inférieure de la tige, les feuilles ou les racines ?

Les expériences de Went ont abouti à la découverte de l'auxine : cette substance voyage de la pointe de la plante, lieu de synthèse, jusqu'au coléoptile, où elle agit sur la croissance,

laquelle dépend de sa concentration. L'auxine a été la première hormone végétale identifiée. À partir des années 1950, on découvre d'autres hormones qui modulent la croissance et le développement des végétaux : gibbérellines, cytokinines, acide abscissique et éthylène. Outre ces phytohormones proprement dites, on identifie d'autres substances – polyamines, brassinolides, acide salicylique, acide jasmonique et ses dérivés, oligosaccharine, etc. – parfois assimilées à des hormones végétales. Il n'est pas évident que ces molécules agissent à distance, comme les hormones, et ces substances et les composés associés sont plutôt dénommés régulateurs de la croissance végétale, ou phytorégulateurs. Ces régulateurs ont une caractéristique commune : la capacité de commander et de modifier la croissance et le développement des plantes.

Aucun des régulateurs découverts dans les plantes n'exerce de fonction hormonale connue chez les animaux, pas plus que le système endocrinien des animaux n'a d'équivalent chez les plantes : les cellules des plantes et des animaux communiquent à l'aide de signaux chimiques différents. Il n'empêche que les éléments et les mécanismes intracellulaires qui règlent les réactions des plantes aux hormones sont analogues à ceux du règne animal.

Les plantes captent la lumière solaire, elles restent immobiles dans l'environnement et ne se conforment à aucun modèle précis dans leur première phase de développement. Les animaux, en revanche, se déplacent, utilisent différentes stratégies pour s'alimenter, et leur croissance est précisément orchestrée. La formidable capacité des plantes à se développer en s'adaptant à l'environnement, et la

faculté des régulateurs végétaux à moduler ce développement, montrent la souplesse de la cellule végétale, la diversité et la richesse des phytorégulateurs. Ces caractéristiques ont-elles déterminé le choix spécifique d'un ensemble de messagers chimiques intercellulaires ? Les animaux et les plantes ont-ils des ancêtres communs où sont apparus les premiers mécanismes des réactions intracellulaires ?

Détermination du rôle des hormones

Les hormones végétales participent à de nombreux mécanismes physiologiques, et il n'est pas toujours aisé de déterminer si une seule hormone agit ou si une combinaison d'hormones différentes intervient. Dès lors, comment étudier l'action d'une hormone dans un tel labyrinthe de métabolites et de réactions ? Les chercheurs s'efforcent de mettre au point des dispositifs expérimentaux où une hormone déterminée joue un rôle unique ou prépondérant dans un mécanisme physiologique.

Pour cela, les physiologistes utilisent fréquemment des mutants dont la synthèse hormonale ou celle d'un élément de la chaîne des réactions est perturbée.

1. HORMONES ET RÉGULATEURS de la croissance végétale se regroupent en familles, dont les cinq éléments les plus représentatifs sont indiqués dans la partie supérieure : auxines (AIA, acide indolacétique), éthylène, gibbérellines (GA₁), cytokinines (zéatine) et acide abscissique (ABA). Les clichés illustrent la capacité des hormones végétales à réguler la croissance et la morphogenèse des cultures cellulaires. En faisant varier les proportions des hormones et des régulateurs, on peut obtenir des tissus peu différenciés (cal, zone jaune) ou déclencher la différenciation des bourgeons (zone verte, en haut, à gauche), des tiges (en haut, à droite et en haut, à gauche) et des racines (en bas, à droite).