

La musique pour les paroles

L'intonation de la parole aide les bébés à apprendre leur langue maternelle.

Comment apprenons-nous à parler ? Comment les bébés isolent-ils des mots enchaînés dans des phrases ? L'intonation de la parole est un élément clé : elle découpe les phrases en groupes de quelques mots. Dès les premiers jours de notre vie, nous percevons les différences d'intonation qui marquent ce découpage : nous pouvons alors commencer à apprendre les mots et la structure de notre langue maternelle.

Comment apprenons-nous un mot ? Avant que nous découvriions son sens en confrontant les diverses situations dans lesquelles nous l'entendons, nous devons le distinguer des autres mots des phrases. Cette distinction n'est pas aisée : les mots parlés ne sont pas tous séparés par des silences, comme les mots écrits le sont par des espaces blancs.

Selon certains psycho-linguistes, lorsque nous entendons une phrase, au lieu de la découper en mots, puis d'identifier les mots et de retrouver leur sens, nous essayons plutôt, à chaque

instant, d'identifier tous les mots qui pourraient se trouver dans cette phrase. Par exemple, en entendant « chat grincheux », nous envisageons, un court instant, la possibilité que nous ayons entendu le mot « chagrin ». Nous ne décidons des mots que nous avons réellement entendus qu'après l'audition de la syllabe « cheux », dont nous savons qu'elle ne constitue pas un mot en français, alors que « chat » et « grincheux » existent tous les deux.

Ce modèle n'est pas universellement accepté. En outre, les bébés, qui ne connaissent pas encore les mots de leur langue, ne peuvent faire la même analyse. En revanche, ils perçoivent un premier niveau de découpage de la phrase, fondé sur l'intonation de la parole. Lorsque nous prononçons une phrase, nous regroupons les mots en petites unités d'intonation, qui possèdent chacune un contour mélodique (habituellement montant-descendant), avec un petit ralentissement du tempo sur la fin. Chaque unité contient un ou

deux mots dits « de contenu » (les noms, les verbes et les adjectifs) et plusieurs mots ou éléments grammaticaux (articles ou auxiliaires).

MATI ET MA-TI

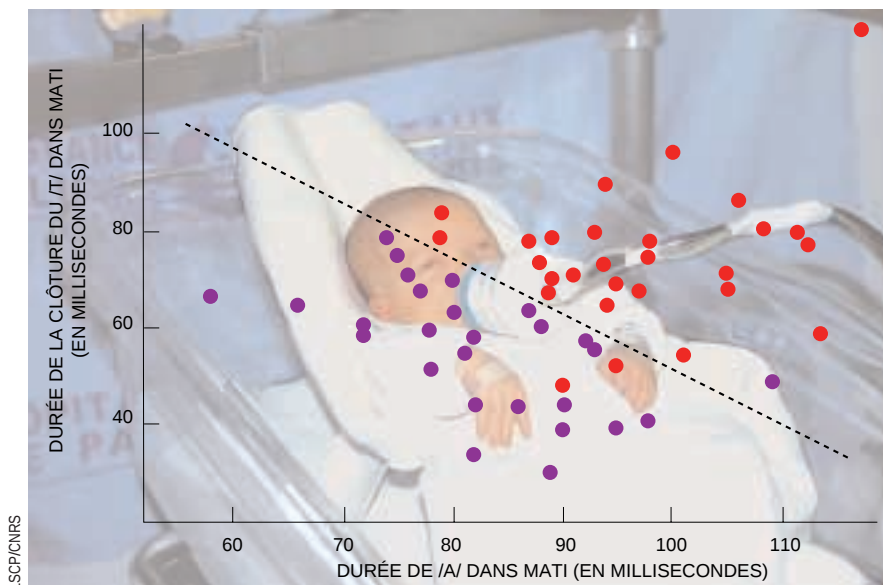
Nous avons fabriqué des « mots » bisyllabiques de deux catégories, tous homonymes à « mati » : dans une catégorie, ils chevauchent deux unités d'intonation, tel « mati » extrait de « panorama typique » ; dans l'autre, ils sont au milieu d'une unité d'intonation, tel « mati » extrait de « mathématicien ». Nous avons fait entendre ces « mati » à des nouveau-nés dont nous suivions l'intérêt par la méthode de succion non nutritive : un bébé entend un stimulus pour chaque succion qu'il fait sur une tétine reliée à un capteur de pression ; lorsque le bébé est lassé d'entendre toujours la même chose, l'intensité de la succion diminue. Les bébés auxquels on fait alors entendre des « mati » de l'autre catégorie recommencent à téter plus que ceux d'un groupe témoin auxquels on fait entendre toujours le même type de stimulus. Nous avons observé le même résultat en espagnol. Malgré l'homonymie, les bébés perçoivent la différence d'intonation.

Les unités d'intonation renseignent aussi sur la syntaxe de la langue, et même sur sa structure abstraite. La manière dont nous regroupons les mots en unités d'intonation, lorsque nous parlons, dépend en effet de la structure syntaxique des phrases : la limite entre deux unités d'intonation correspond toujours à une frontière entre deux constituants syntaxiques (par exemple, entre le sujet et le groupe verbal).

Les langues du monde constituent deux grandes familles : récursives à droite lorsque l'on ajoute des éléments à la fin des phrases (c'est-à-dire du côté droit, quand on écrit : « l'homme qui a vu le chien qui poursuivait le chat qui chassait l'oiseau »), et récursives à gauche dans le cas contraire (par exemple, le turc ou le japonais). La récursivité, présente à tous les niveaux de structure, est indispensable à toute analyse syntaxique. Elle se reflète dans l'intonation : à l'intérieur des unités d'intonation, le mot le plus accentué est à droite pour les langues récursives à droite, à gauche pour les langues récursives à gauche. La perception, par les bébés, des unités d'intonation ne peut donc que leur faciliter l'apprentissage des subtilités du langage.

Anne CHRISTOPHE

Lab. de sciences cognitives et psycholinguistique, CNRS-EHESS, Paris



La durée du /a/ et la durée de clôture du /t/ permettent de distinguer, parmi des mots bisyllabiques homonymes à « mati », ceux qui proviennent d'un seul mot (en violet), tel mathématicien et ceux qui proviennent de la jonction de deux mots (en rouge), tel panorama typique. Les nouveau-nés perçoivent cette différence d'intonation, qui facilite la compréhension du langage (ils le manifestent par l'intermédiaire d'une sucette à capteur de pression).

La mémoire des glaces du Groenland

CLAUDE BOUTRON

Les neiges et glaces du Groenland révèlent l'histoire de la pollution atmosphérique par les métaux lourds, de l'Antiquité à nos jours.

La pollution de l'atmosphère par les métaux lourds est une menace. À forte dose, certains d'entre eux sont toxiques. Ainsi les personnes qui ont absorbé une grande quantité de plomb souffrent de saturnisme, maladie qui se manifeste par de terribles douleurs abdominales, des diarrhées et des vomissements, une anémie et une atteinte du système nerveux... Les personnes excessivement exposées au mercure souffrent également d'atteintes du système nerveux. À doses inférieures, l'exposition prolongée pendant des siècles pourrait conduire à des altérations du cerveau humain et modifier l'évolution de notre espèce.

Cette dernière est pourtant responsable de cette pollution, car c'est principalement elle qui rejette les métaux dans l'atmosphère : à la fin des années 1960, les rejets de plomb étaient supérieurs à 400 000 tonnes par an, soit près de 50 fois les émissions naturelles (volcaniques notamment). Depuis quand cette pollution existe-t-elle ? Date-t-elle de la Révolution industrielle ?

Les neiges et glaces qui s'accumulent année après année dans les régions polaires sont d'extraordinaires archives de l'évolution passée de l'atmosphère : les isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène, par exemple, livrent l'histoire du climat du passé ; les composés du soufre et de l'azote, ainsi que le dioxyde de carbone et le méthane des bulles d'air piégées dans les glaces ajoutent à la connaissance de notre atmosphère.

Année après année, les glaces et neiges des régions polaires ont également conservé la mémoire du plomb, du cuivre ou d'autres métaux qui étaient

présents dans l'atmosphère ancienne. L'analyse des concentrations en ces métaux, dans les glaces polaires, permet donc de reconstituer l'évolution des pollutions du passé. Elle a montré que la pollution par les métaux existait déjà il y a plusieurs milliers d'années, lors de l'apogée de l'Empire romain, sur tout l'hémisphère Nord.

De nouvelles carottes

Les couches de neige et de glace déposées au fil du temps dans les régions centrales du Groenland racontent l'histoire, tant ancienne que récente, de la pollution atmosphérique : les métaux que les rejets naturels ou anthropiques introduisent dans l'atmosphère sous la forme de fines particules sont transportés par les masses d'air jusque dans les régions polaires, où elles se retrouvent incluses dans les neiges et dans les glaces.

Une partie de ces particules se dépose sur les calottes polaires : certaines servent de germes de condensation dans les nuages, d'autres sont incorporées dans les flocons de neige au cours de leur descente vers le sol, et d'autres encore retombent par simple sédimentation. Ces particules prises dans les neiges et glaces polaires s'enfoncent lentement, à mesure que de nouvelles couches de neige se déposent. L'épaisseur des couches annuelles de neige est variable ; au centre du Groenland, elle est de l'ordre de 40 centimètres près de la surface.

Disposant d'échantillons de ces neiges et de ces glaces, peut-on en tirer l'histoire de la pollution en métaux

lourds ? Il y a près de 25 ans, Clair Patterson et ses collègues de l'Institut de technologie de Californie ont obtenu les premiers résultats sur l'évolution des concentrations en plomb dans les neiges et dans les glaces du Groenland. Pourtant, c'est seulement depuis 1989 que ces archives ont été exploitées méthodiquement. Les campagnes européennes de carottage EUROCORE et GRIP (l'acronyme de *Greenland Ice Core Project*, soit « Programme de carottage glaciaire au Groenland ») ont livré plusieurs carottes prélevées au site nommé Summit. Ce site, qui se trouve au centre du Groenland, par 72°34' Nord et 37°37' Ouest, est à une altitude de 3 238 mètres, soit environ à 3 000 mètres au-dessus du socle rocheux.

Nous avons étudié deux carottes d'une dizaine de centimètres de diamètre : la première avait été prélevée dans les 70 mètres supérieurs, tandis que la seconde était prise sur toute l'épaisseur de la calotte, de la surface jusqu'au socle rocheux, à 3 028 mètres de profondeur. La première couvre les deux derniers siècles, du début de la Révolution industrielle jusqu'à nos jours ; la seconde couvre plus de 150 000 ans, notamment les périodes de la Grèce et de la Rome antiques et du Moyen Âge.

L'eau la plus pure de la planète

L'analyse des métaux dans de telles carottes se situe aux limites actuelles de la chimie analytique de pointe. Les glaces polaires constituent en effet l'eau la plus pure de la planète : les métaux lourds n'y sont présents qu'en concen-

trations extrêmement faibles, de l'ordre du picogramme (millième de milliardième de gramme) par gramme. Pour doser le cadmium, par exemple, on doit être capable de trouver un gramme de cadmium dans 20 millions de tonnes de glace ! Cette faiblesse des concentrations à doser a deux conséquences : d'une part, la moindre contamination

des carottes anéantit les informations stockées dans les glaces ; d'autre part, les carottes doivent être analysées par des méthodes ultra-sensibles, capables de trouver une aiguille dans une botte de foin.

Les méthodes de prélèvement sur le terrain sont de plusieurs types, selon la profondeur que l'on veut atteindre.

Pour récupérer des échantillons proches de la surface, tout d'abord, on met en œuvre des protocoles de prélèvement qui ne contaminent pas les échantillons : des opérateurs munis de combinaisons spéciales, non contaminantes, de gants en polyéthylène, de pelles ou de scies propres creusent des puits dont ils extraient la



1. LES NEIGES ET GLACES du Groenland sont prélevées à l'aide de techniques variées : grâce à de petits carottiers ultra-propres, pour les faibles profondeurs (*en haut à gauche*) ; grâce à des carottiers électromécaniques de moyenne profondeur (*en haut à droite*) ; grâce à des carottiers de grande profondeur. À droite, on voit la récupération d'une carotte au cours du carottage européen GRIP, qui a atteint plus de trois kilomètres. Ces carottes sont ramenées, congelées, au laboratoire, emballées dans des sacs étanches en polyéthylène. Sauf pour les échantillons proches de la surface, le prélèvement contamine l'extérieur de la carotte et impose une décontamination.



Claude Rado

neige. Puis, pour récupérer des carottes à des profondeurs comprises entre cinq et une vingtaine de mètres (soit plusieurs décennies d'accumulation des neiges au Groenland), on emploie des carottiers mécaniques propres, entièrement construits en matières plastiques, tel le polycarbonate. Ces carottiers sont préalablement nettoyés à l'acide, en laboratoire.

Les carottiers utilisés pour atteindre les profondeurs supérieures contaminent les échantillons. Des carottiers de moyenne profondeur, tel celui qui apparaît sur la figure 1, atteignent quelques centaines de mètres, soit quelques siècles à quelques millénaires ; le carottage se fait alors « à sec », sans fluide dans le trou.

Pour atteindre des profondeurs encore supérieures, on doit employer de grands carottiers métalliques, dans un trou rempli d'un liquide.

Ces appareils sont soit électromécaniques (un moteur électrique, alimenté par l'intermédiaire d'un câble qui descend dans le trou, fait tourner un cylindre métallique de dix centimètres de diamètre intérieur et de quelques mètres de longueur, muni de couteaux), soit thermiques (une résistance électrique chauffante, à la base du carottier, fond la glace sur une couronne circulaire). Ils contaminent doublement la glace : d'une part, parce qu'ils sont métalliques ; d'autre part, parce que l'on doit remplir le trou avec un fluide qui équilibre la pression considérable qui s'exerce sur les parois et

qui le ferait se refermer ; ce fluide, souvent à base de kérosène d'aviation, accroît la contamination de l'extérieur des carottes.

Naturellement, les échantillons obtenus par ces diverses méthodes doivent être traités différemment : les échantillons prélevés proprement dans les puits peuvent être analysés directement. En revanche, on a dû mettre au point des méthodes spéciales de traitement des carottes profondes, dont la partie externe est contaminée.

Des glaces d'âge connu

Un point particulièrement important est celui de la datation des échantillons obtenus. Des méthodes variées sont utilisées. Celles qui exploitent les variations saisonnières de composition de la neige ou de la glace permettent de compter les années une à une à partir de la surface : on mesure par exemple les variations des rapports d'abondances isotopiques de l'oxygène 18 et de l'oxygène 16, ou du deutérium et de l'hydrogène (les isotopes d'un élément chimique ont le même nombre de protons, mais des nombres de neutrons différents ; par exemple, le noyau de l'oxygène 16 est composé de 8 protons et de 8 neutrons, tandis que celui de l'oxygène 18 renferme 8 protons et 10 neutrons).

Une autre famille de méthodes repose sur l'identification « d'horizons repères », c'est-à-dire de couches où

des événements importants ont laissé des signatures caractéristiques : il s'agit par exemple des éruptions volcaniques majeures, telles celles du Vésuve en l'an 79 de notre ère, du Tambora en 1815, du Krakatoa en 1883.

Dans le cas de Summit, ce type d'approche permet d'obtenir une datation très précise des glaces déposées au cours des 10 000 dernières années : la précision est meilleure que dix ans pour des périodes inférieures au millénaire ! Pour les parties plus profondes des carottes, toutefois, on doit également utiliser des modèles qui décrivent l'écoulement de la glace ; la précision devient moins bonne.

La hantise de la contamination

La manipulation des échantillons impose des précautions draconiennes. Tout d'abord, les échantillons sont maintenus, de Summit jusqu'au laboratoire, à une température toujours bien inférieure à 0°C, afin d'éviter la migration des contaminants, de l'extérieur vers le cœur. Au laboratoire (spécialement conçu pour éviter les contaminations), les échantillons sont placés en chambre froide dans une enceinte à flux laminaire d'air purifié, où nous effectuons une décontamination mécanique à l'aide d'un tour entièrement construit en matières plastiques : nous éliminons des couches successives, de l'extérieur de la carotte jusqu'à son centre, ce qui permet, en fin d'opération, d'accéder au cœur, qui est généralement exempt de contamination.

Toutes les précautions doivent être prises pour éviter que les contaminants externes n'atteignent le cœur. Lors de la décontamination, notamment, on doit éviter que le couteau qui découpe la carotte ne reporte sur la partie dégagée une fraction de la contamination qui était présente dans la partie éliminée. Au cours de ces opérations de décontamination, on récupère les diverses couches éliminées, afin de vérifier ultérieurement que l'on est bien parvenu à un cœur propre : on trace les courbes de concentration, de l'extérieur jusqu'au centre ; quand un plateau se dessine, on conclut que la concentration mesurée représente vraiment ce qu'il y avait dans la neige ou dans la glace.



Claude Bourton

2. DÉCONTAMINATION d'une carotte de glace en chambre froide à l'intérieur d'une enceinte à flux laminaire d'air ultra-filtré. La carotte, maintenue horizontalement dans un tour entièrement construit en polyéthylène, est découpée à partir de son extérieur. Chaque couche annulaire est récupérée séparément pour analyse. On isole ainsi la partie centrale, généralement vierge de toute contamination.

De très grandes précautions doivent également être prises au cours de l'analyse proprement dite. Toutes les analyses sont effectuées dans des salles blanches, similaires à celles qui sont utilisées dans l'industrie micro-électronique, où l'air, ultra-filtré, est en légère surpression par rapport à l'extérieur ; les opérateurs portent des vêtements spéciaux non émissifs de poussière et des gants en polyéthylène. Nous n'utilisons que des matériaux non contaminants pour les métaux mesurés, tels le polyéthylène basse densité ou certains téflons, pour les récipients qui sont en contact avec les échantillons. L'ensemble du matériel utilisé subit des nettoyages poussés, par immersion dans des bains d'acide nitrique chaud, de pureté croissante. Les bains terminaux sont préparés à l'aide d'acide nitrique de très haute pureté, mis au point pour l'analyse des roches lunaires.

Parmi les techniques spectrométriques ultra-sensibles qui sont utilisées figure notamment la spectrométrie de masse à ionisation thermique, que nous utilisons avec notre collègue australien Kevin Rosman, de l'Université de technologie de Perth. Cette technique permet tout à la fois de déterminer la composition isotopique du plomb (l'abondance relative des isotopes

204, 206, 207 et 208) et la concentration totale de ce métal dans des échantillons ne contenant que 10^{-11} gramme (un cent milliardième de gramme) de plomb.

Les volumes d'échantillons utilisés sont de l'ordre de dix millilitres ; on les transporte congelés en Australie, afin de limiter les échanges avec les parois des flacons. Puis, en salle blanche, on les évapore lentement en présence d'acide nitrique ultra-pur et d'un mélange de silica gel et d'acide phosphorique, jusqu'à l'obtention d'une goutte. Cette dernière est alors transférée sur un filament en rhénium, qui est introduit dans le spectromètre de masse ; une fois le vide effectué dans le spectromètre, on chauffe le filament afin de produire un faisceau d'ions métalliques qui sont déviés par des champs électriques et magnétiques. Comme la déviation des ions, dans le spectromètre, dépend du quotient de leur masse par leur charge électrique, on détermine l'abondance relative des divers isotopes. De surcroît, l'introduction d'une quantité connue d'un traceur enrichi en plomb 205 permet d'accéder à la concentration totale en plomb (méthode de dilution isotopique).

La spectrométrie de fluorescence atomique laser, que nous utilisons avec

Michael Bolshov et ses collègues de l'Institut de spectroscopie de Troitzk (près de Moscou), est une autre technique performante. Cette fois, on vaporise 50 microlitres de glace fondue dans le faisceau d'un laser accordable à colorant doublé en fréquence. On mesure la fluorescence des atomes du métal dosé (la longueur d'onde du laser est choisie pour exciter spécifiquement les atomes de ce métal). Cette fois, il s'agit d'une technique relative : le signal obtenu permet de déterminer la concentration du métal dosé par rapport à la concentration (connue) d'étalons contenant le même métal.

Encore rarement utilisée, la spectrométrie de fluorescence atomique laser a mesuré les concentrations en plomb, en cadmium et en bismuth à partir de très petits volumes d'échantillon jusqu'à des concentrations de l'ordre de 10^{-13} gramme (ou dix millièmes de milliardième de gramme) par gramme de glace, ce qui correspond à des masses détectées comprises entre 10^{-16} et 10^{-15} gramme.

Enfin, avec Freddy Adams, de l'Université d'Anvers, nous avons étudié les composés organo-métalliques, tels ceux qui sont ajoutés dans l'essence automobile comme additifs antidétonants. Ces additifs sont du plomb tétraéthyle ou tétraméthyle, mais ils



3. INSTRUMENTS MÉDICAUX retrouvés à Herculanum et ustensiles de cuisine en bronze datant de l'Empire romain. Les glaces du Groenland montrent que la métallurgie du cuivre, dans des fours à ciel ouvert, a pollué notre atmosphère dès l'Antiquité. Il y a 7 000 ans environ, on utilisait déjà le cuivre natif. La production de cuivre a considérablement augmenté à partir d'il y a 5 000 ans, avec l'apparition des techniques qui permettent de traiter les carbonates, les oxydes, puis, plus tard, les sulfures de cuivre.

sont détectés au Groenland sous la forme de plomb diéthyle, diméthyle, triéthyle ou triméthyle, par suite de modifications chimiques qu'ils subissent lors de leur transport dans l'atmosphère.

Pour examiner les principaux résultats obtenus, nous envisagerons successivement deux périodes : d'une part, une période qui couvre toute l'Antiquité jusqu'à la Renaissance (de 1000 avant notre ère à l'an 1500) et, d'autre part, la période qui a suivi la Révolution industrielle. Dans le premier cas, nous verrons que l'analyse des glaces apporte des données du plus haut intérêt pour l'archéologie. Dans le second cas, nous verrons comment nos analyses indiquent l'histoire récente de la pollution atmosphérique.

L'Empire romain au banc des accusés

Les carottes que nous avons analysées ont permis d'étudier les variations des concentrations en plomb de 1 000 avant notre ère à l'an 1 500, période qui a vu le développement, puis le déclin de la civilisation grecque antique, de la République et de l'Empire romains, ainsi que le Moyen Âge et la Renaissance.

À Summit, la glace correspondant à cette période se trouve entre 620 et 130 mètres de profondeur. Elle est datée avec une précision meilleure que dix ans. Les concentrations en plomb dans la glace étaient de l'ordre de 0,5 picogramme par gramme il y a 3 000 ans. Comme ces concentrations sont analogues à celles que l'on trouve dans la glace datant d'il y a plus de 7 000 ans (avant le début de la production de plomb par l'homme), on en déduit que le plomb déposé dans la glace d'il y a 3 000 ans était encore entièrement d'origine naturelle.

À partir d'il y a 3 000 ans, les concentrations croissent progressivement, atteignant des valeurs proches de deux à trois picogrammes par gramme, c'est-à-dire environ cinq fois la concentration naturelle, pendant une période de plusieurs siècles (d'environ 500 avant notre ère à l'an 200) ; elles rediminuent ensuite pour retrouver des valeurs proches des valeurs naturelles vers l'an 500, puis elles augmentent à nouveau au cours du Moyen Âge, jusqu'à des valeurs de l'ordre de quatre picogrammes par gramme.

Aucun phénomène naturel ne permet d'expliquer ces variations, qui révè-

lent donc une très ancienne pollution atmosphérique par le plomb : près de 2 000 ans avant la Révolution industrielle, les mineurs et métallurgistes grecs et romains polluèrent l'atmosphère de la Terre ; cette pollution fut assez intense pour atteindre l'Arctique, à des milliers de kilomètres du bassin méditerranéen.

Le plomb était alors extrait de la galène, sulfure de plomb qui contient également des concentrations notables d'argent (ce dernier était isolé lors du traitement du minerai). Après un grillage qui transformait les sulfures en oxydes, les minerais oxydés étaient fondus dans des fours, où l'on obtenait un mélange de plomb et d'argent métalliques : ce « plomb d'œuvre » était refondu à l'air libre, ce qui séparait l'argent de l'oxyde de plomb, ou litharge ; enfin la litharge était refondue en présence de charbon de bois, qui réduisait l'oxyde et formait le plomb métallique.

Les archéologues avaient montré que l'histoire de la production du plomb a commencé il y a près de 6 000 ans, pendant l'Âge du cuivre. La production a ensuite cru constamment, atteignant près de 80 000 tonnes par an à l'apogée de l'Empire romain, avant de décliner fortement en même temps que l'Empire. C'est seulement au IX^e siècle que cette production a recommencé à croître, sans discontinuer, jusqu'à nos jours.

Les opérations de production du plomb étaient très polluantes : on estime que les fours utilisés, qui fonctionnaient à l'air libre, rejetaient dans l'atmosphère jusqu'à cinq pour cent des quantités produites, au cours du traitement des minerais : ils auraient émis vers l'atmosphère jusqu'à 4 000 tonnes de plomb par an à l'apogée de l'Empire romain.

Les textes anciens, des sédiments des lacs suédois ou des tourbes anglaises avaient indiqué que ces émissions ont provoqué de graves pollutions locales ou régionales, mais les données du Groenland ont montré que ces rejets ont pollué une grande partie de l'atmosphère de l'hémisphère Nord, jusque dans l'Arctique.

Le cuivre, autre pollution très ancienne

La production des autres métaux a-t-elle provoqué une pollution équivalente ? Oui : nous avons récemment

démonstré l'existence d'une pollution en cuivre pendant l'Antiquité. Nous avons mesuré les concentrations du métal rouge dans les mêmes carottes de glace où nous avons dosé le plomb : il y a 2 500 ans, les concentrations en cuivre ne différaient pas des concentrations naturelles, mais de 500 avant notre ère à l'an 1500, les concentrations en cuivre sont devenues, en moyenne, deux fois supérieures aux concentrations naturelles. Cette augmentation des concentrations ne s'explique pas par des causes naturelles. Nous pensons qu'elle est le signe d'une ancienne pollution de l'atmosphère de l'ensemble de l'hémisphère Nord.

D'où ce cuivre provenait-il ? Dans l'Antiquité (comme aujourd'hui), l'essentiel du cuivre présent dans l'atmosphère provenait des activités de production de ce métal. Pour savoir si l'histoire de ces émissions correspondait aux variations observées dans les glaces du Groenland, nous avons d'abord cherché à reconstituer l'histoire de la production mondiale du métal rouge (voir la figure 6), par compilation des données archéologiques et historiques.

Le cuivre a été initialement récupéré sous forme native à partir d'il y a 7 000 ans. Sa production n'est devenue notable qu'il y a 5 000 ans environ, quand sont apparues des techniques qui permettaient de traiter les minerais (carbonates et oxydes de cuivre) et que les premiers métallurgistes allièrent le cuivre à l'étain pour produire du bronze. La production mondiale a ensuite augmenté régulièrement, avec la mise au point, il y a 4 500 ans environ, de traitements des minerais de sulfures de cuivre. On estime que la production cumulée, de l'an 2 000 à l'an 700 avant notre ère, a été de 500 000 tonnes.

À l'époque romaine, la production a considérablement augmenté, en raison d'une forte croissance de la demande, notamment pour la frappe de la monnaie : il y a 2 000 ans, on a produit jusqu'à 15 000 tonnes par an, surtout dans la Péninsule ibérique (d'où provenait près de la moitié de la production mondiale à l'époque romaine), à Chypre et en Europe centrale. La production cumulée entre l'an 250 avant notre ère et l'an 350 est évaluée à cinq millions de tonnes.

Après la chute de l'Empire romain, la production du cuivre a diminué



Michel Tarpin

4. LINGOTS DE PLOMB datant de l'Antiquité romaine. Sous l'Empire romain, la production de plomb atteignit 80 000 tonnes par an ; les principales mines se trouvaient en Espagne, dans les Balkans et en Asie mineure. Le plomb, métal facile à travailler, était utilisé pour la fabrication de nombreux objets d'usage courant : monnaie, tuyaux, statuettes, poids ou ustensiles de cuisine. Ces derniers contaminaient les mets et les vins, de sorte

que certains historiens ont proposé que le saturnisme, ou intoxication par le plomb, aurait été l'une des causes de la chute de l'Empire. Au début du XIX^e siècle, une épidémie de saturnisme frappa les artisans parisiens : parmi les 1 200 personnes admises à l'Hôpital de la Charité pour cause de saturnisme, la moitié environ travaillaient le plomb ; près de 400 étaient peintres, d'autres plombiers.

en Europe, où elle est restée faible, de l'ordre de 2 000 tonnes par an, jusqu'au VIII^e siècle. Elle a ensuite repris pendant le Moyen Âge, en raison de l'exploitation de nouveaux gisements en Allemagne et en Suède, respectivement à partir du IX^e et du XIII^e siècle. Toutefois, au cours du Moyen Âge, la production fut surtout importante en Chine, notamment pendant la dynastie des Sung du Nord (960-1127) : lors de cette période, la production chinoise atteignit 13 000 tonnes par an environ, valeur proche de celle qui était atteinte dans le bassin méditerranéen à l'apogée de l'Empire romain.

La production a ensuite décliné à nouveau, jusqu'à 2 000 tonnes par an au XIV^e siècle, ne recommençant à croître qu'après la Renaissance ; elle n'a alors plus cessé d'augmenter, notamment en raison de l'essor des industries électriques. Aujourd'hui, les neuf millions de tonnes produites chaque année proviennent principalement du Chili, du Pérou, du Zaïre, de la Zambie et de la Chine.

Quelles quantités de cuivre cette production a-t-elle libérées dans l'atmosphère ? Pour le déterminer, nous avons étudié les facteurs d'émission (la masse de cuivre émise dans l'atmosphère par masse de cuivre produite) correspondant aux techniques successivement utilisées. Ce que nous savons des techniques métallurgiques

antiques suggère que les facteurs d'émission étaient certainement considérables dans l'Antiquité, de l'ordre de 15 pour cent ; ils sont restés à cette valeur élevée jusqu'à la Révolution industrielle, car les techniques ont peu évolué au cours des millénaires. Le traitement des minerais de sulfure de cuivre nécessitait de nombreuses étapes successives de grillage, de fusion, d'oxydation et d'affinage, effectuées dans des fours primitifs, à l'air libre.

Quand les procédés furent finalement améliorés, à partir du XIX^e siècle, les facteurs d'émission diminuèrent considérablement, jusqu'à environ un pour cent au début de ce siècle et à 0,25 pour cent aujourd'hui.

En combinant l'histoire de la production et des facteurs d'émission, on obtient une reconstitution des variations des émissions au cours des 5 000 dernières années. Il y aurait eu trois maxima d'émission atmosphérique de cuivre par l'homme : le premier, environ 2 300 tonnes par an, à l'apogée de l'Empire romain ; le deuxième, d'amplitude similaire, à l'apogée de la dynastie des Sung du Nord en Chine, vers 1080 ; le troisième, de l'ordre de 23 000 tonnes par an, dans un passé très récent (les émissions rediminuent aujourd'hui).

Si l'on admet que les émissions naturelles de cuivre vers l'atmosphère sont de l'ordre de 2 000 à 3 000 tonnes par

an, c'est-à-dire une valeur proche des maxima romains et Sung, un raisonnement sommaire montre que les concentrations en cuivre devraient avoir approximativement doublé dans la glace du Groenland à l'époque romaine : c'est ce qui est observé. Il devrait en être de même à l'époque de la dynastie des Sung du Nord, mais nos données du Groenland ne permettent pas de le vérifier, car aucun échantillon de glace de cette époque n'a encore été analysé.

Sur l'ensemble de la calotte glaciaire du Groenland, 2 800 tonnes de cuivre se seraient déposées au cours des 2 500 années qui ont précédé la Révolution industrielle. C'est près de 15 fois les quantités qui se sont déposées sur le Groenland de la Révolution industrielle jusqu'à nos jours !

Si nos travaux montrent ainsi une très ancienne pollution en cuivre, ils ouvrent également la voie à une approche quantitative de l'histoire de la production de ce métal (et des autres métaux) pendant l'Antiquité. Les archéologues ont un besoin crucial de telles informations, car l'histoire de la production des métaux, qui a joué un rôle majeur dans le développement des sociétés humaines, reste très parcellaire et imprécise ; une approche quantitative, fondée sur les archives que constituent les carottes de glace, devrait considérablement l'améliorer.

De la Révolution industrielle à nos jours

Examinons maintenant la pollution plus récente, par les divers métaux. La carotte prélevée entre la surface et 70 mètres de profondeur, à Summit, permet de reconstituer cette pollution des années 1770 à nos jours. Tout d'abord, les concentrations en plomb sont proches de 10 picogrammes par gramme dans les années 1770, c'est-à-dire environ le double des concentrations observées à la Renaissance. Elles croissent ensuite jusqu'à 50 picogrammes par gramme, dans les années 1900, en raison de la croissance progressive des émissions de plomb par l'industrie des métaux non ferreux, par la sidérurgie et par la combustion du bois et du charbon. Au cours des années 1920 et 1930, les concentrations auraient ensuite décliné passagèrement, peut-être en raison de la dépression économique.

Puis, des années 1930 à la fin des années 1960, les concentrations ont

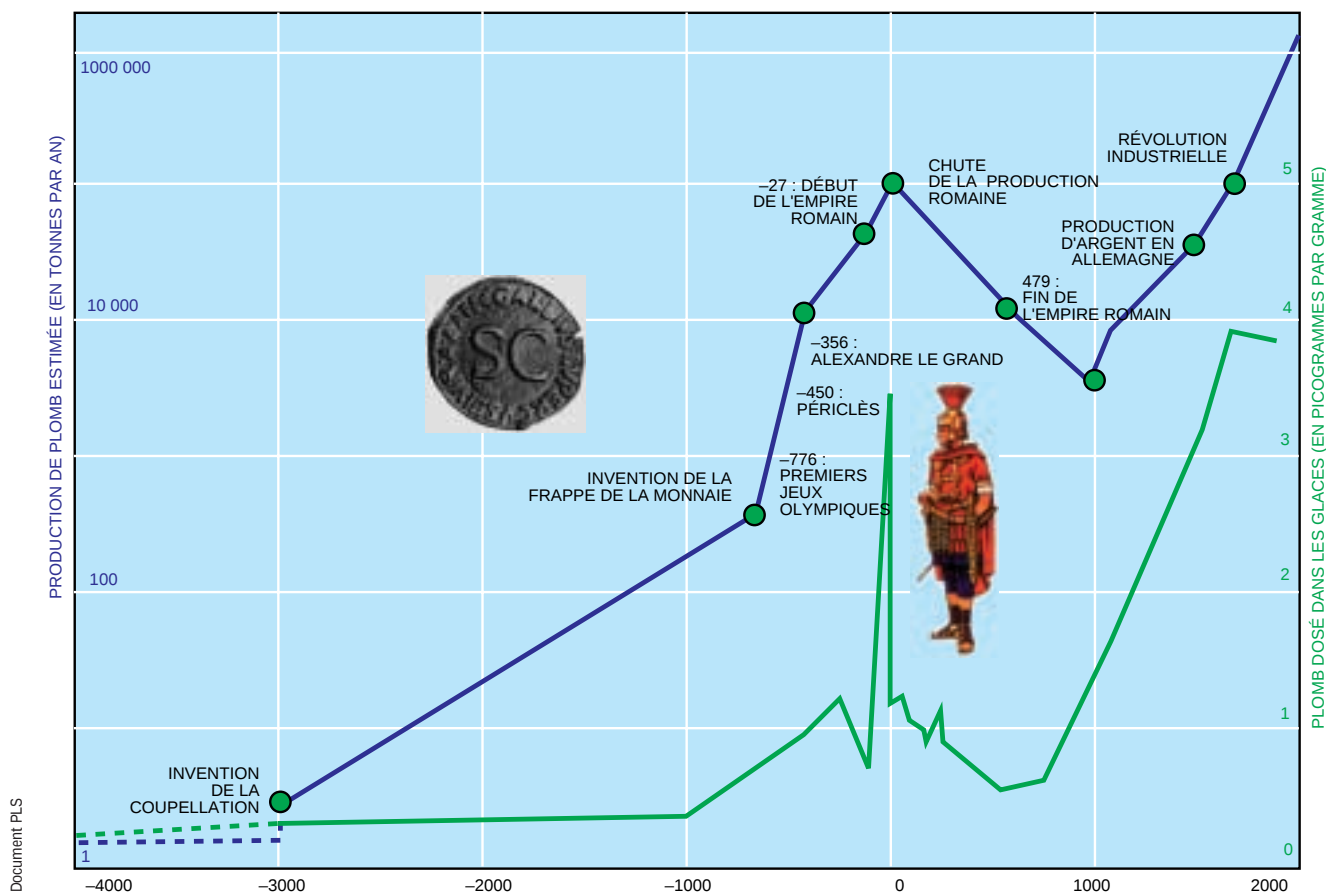
considérablement augmenté, en raison de l'introduction (en 1923), puis de l'utilisation généralisée des composés organo-plombés (le plomb tétraéthyle et le plomb tétraméthyle), comme additifs antidétonants dans les carburants pour automobiles et pour avions. Au maximum des années 1960, la quantité d'additifs utilisée avoisinait les 400 000 tonnes par an (dont deux tiers environ pour les États-Unis). Près de 70 pour cent de ces quantités étaient directement rejetées dans l'atmosphère, à la sortie des pots d'échappement : l'ensemble de notre planète fut terriblement contaminé.

Les concentrations maximales atteintes dans les neiges du Groenland à la fin des années 1960 – environ 100 picogrammes par gramme – sont plus de 200 fois supérieures aux concentrations naturelles d'il y a plusieurs milliers d'années, et la pollution par le plomb fut, de loin, l'une des pollutions globales les plus spectaculaires (les facteurs d'augmentation pour les composés du soufre et de l'azote, pour le

gaz carbonique et pour le méthane sont bien inférieurs).

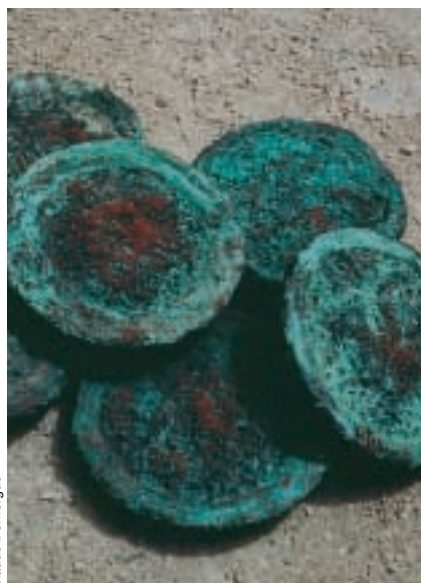
À partir du début des années 1970, les concentrations diminuent d'un facteur dix environ, ce qui ramène les concentrations des années 1990 au niveau de celles de la première moitié du XIX^e siècle. Manifestement, c'est là l'effet de l'abandon progressif des additifs au plomb au cours des deux dernières décennies. D'une part, de plus en plus de véhicules (la quasi-totalité aux États-Unis et au Japon) consomment maintenant une essence non plombée ; d'autre part, les compagnies pétrolières ont été conduites à réduire les concentrations en plomb dans l'essence plombée : en France, la concentration en plomb, qui était de 0,55 gramme par litre en 1976, est passée à 0,15 gramme par litre depuis 1991.

La contribution des additifs au plomb à la pollution généralisée de l'atmosphère, au cours des dernières décennies, a été directement confirmée par la détection de composés organo-plombés, principalement le plomb trié-

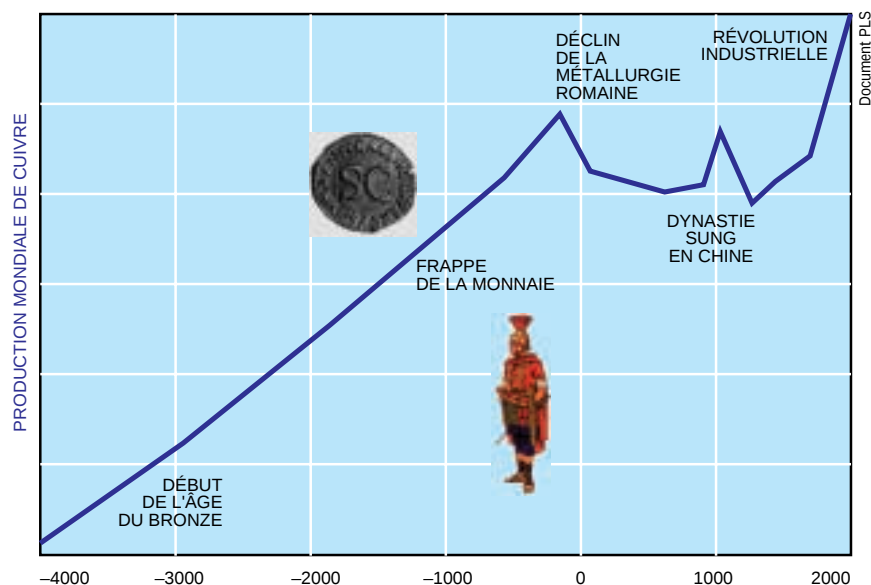


5. LES CONCENTRATIONS EN PLOMB dans les glaces du Groenland ont été altérées par les activités humaines dès le premier millénaire avant notre ère. Sur ce diagramme, on a mis en correspondance la production estimée de plomb et la quantité de plomb présente dans les

glaces. Les analyses montrent que la pollution en plomb de l'atmosphère de l'hémisphère Nord est ancienne. L'Empire romain a largement pollué la Terre. Puis la pollution a repris à partir du Moyen Âge, avant de se généraliser avec l'introduction des additifs pour l'essence.



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).