

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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> et du XIII<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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.