



Matériaux critiques

Le phosphore, de l'or pour un tas de fumier

Élément indispensable à toute vie mais pouvant avoir des conséquences désastreuses sur les écosystèmes, le phosphore a participé à l'essor de l'agriculture industrielle de l'après-guerre en étant utilisé massivement dans les engrais de synthèse. Alors que la demande mondiale en roches phosphatées n'a jamais été aussi forte, les craintes sur le caractère plus ou moins durable de cette ressource amènent à reconsidérer les usages que nous en faisons.



texte Vincent Gautier

Les lecteurs versés dans la science-fiction le connaissent principalement comme l'inventeur des trois lois de la robotique ou de la « psychohistoire », concept au cœur de la saga *Fondation*, actuellement adaptée en série par Apple TV+. Mais Isaac Asimov, accessoirement docteur en biochimie, a également fait de la vulgarisation scientifique son terrain de jeu littéraire. Dans un essai publié en 1959, l'écrivain américain souligne l'importance du « P » figurant sur la droite du tableau de Mendeleïev. Ce « P », la lettre symbolisant le phosphore, n'est rien moins que le « goulot d'étranglement de la vie ». Supprimez-le et le moindre être vivant aura toutes les peines du monde à exister sur notre planète. « Nous pouvons remplacer le charbon par l'énergie nucléaire, le bois par le plastique, la viande par la levure et la solitude par l'amitié. Pour le phosphore, il n'y a ni substitut ni remplaçant », insiste Isaac Asimov.

Des animaux à la moindre molécule d'ADN en passant par les enzymes et les parois de bactéries cellulaires, il y a donc du phosphore partout dans la nature, mais seulement sous une forme oxydée

(phosphate). Le phosphore compte pour environ 1 % de la masse corporelle d'un humain, l'essentiel se nichant dans nos tissus osseux et nos dents. « Peu importe ce que nous mangeons, cette nourriture provient plus ou moins directement des plantes et les plantes croissent grâce au phosphore », ajoute Stuart White, directeur de l'Institut des futurs durables à l'université de technologie de Sydney. Pour stimuler cette croissance et leurs rendements, les agriculteurs enrichissent leurs sols en phosphore avec des fertilisants pouvant également contenir de l'azote (N) et du potassium (K), autres nutriments essentiels. Cette ubiquité apparente ne doit pas occulter le fait que le stock de phosphore disponible sur Terre n'est pas illimité mais fini, ce qui confère à cette ressource un caractère d'autant plus précieux.

LE RATÉ EN OR D'UN ALCHEMISTE

Quand il fait par hasard la découverte de cet élément vers 1669, à Hambourg, Hennig Brandt est en quête d'un bien encore plus précieux : la pierre philosophale, censée transformer n'importe quel métal en or. Une nuit, l'alchimiste allemand pense être





parvenu à ses fins après avoir distillé de l'urine humaine. La forme solide résultant de cette expérience intrigue Brandt par la lumière vert pâle qui en émane. C'est du phosphore. Passé à la postérité, Brandt était-il vraiment le premier à mettre au jour l'élément? Dans son stimulant livre retraçant l'histoire du phosphore¹, John Emsley remarque qu'il était peut-être déjà connu des Romains dans l'Antiquité et que le secret de sa fabrication a pu se perdre avec le temps. Avec son caractère hautement inflammable, surtout sous sa forme blanche, particulièrement instable, le phosphore va hériter du surnom peu flatteur d'«élément du diable». Le phosphore blanc sert par exemple aux bombes incendiaires qui s'abattent sur plusieurs villes allemandes ciblées par les Alliés pendant la Seconde Guerre mondiale dont Hambourg, là-même où Brandt fit sa grande découverte près de trois siècles plus tôt.

Des millénaires avant de l'exploiter pour semer la mort, l'humanité a tiré parti du phosphore pour cultiver le vivant, quand bien même elle ignorait tout de l'identité du bienfaiteur. D'abord grâce au feu et aux cendres contenant du phosphore utilisable par les plantes, puis en recouvrant les champs d'excréments animaux ou humains. Comme le mettra en évidence l'expérience de Brandt, les déchets produits par notre corps recèlent de ce «P» si convoité. Les paysans chinois en avaient déjà conscience il y a des milliers d'années de cela. «Grâce à l'engrais humain, la terre en Chine est encore aussi jeune qu'au temps d'Abraham», observe Victor Hugo dans le chapitre «La terre appauvrie par la mer» des *Misérables*, où l'écrivain se lamente de voir cet «or fumier [...] balayé à l'abîme» à Paris et en France. C'est qu'au XIX^e siècle, l'urbanisation commence à priver les paysans d'un fertilisant humain échouant désormais dans les cours d'eau. Dès lors, où trouver le phosphore? Une première piste mène aux zones d'accumulation de guano, comme les îles Chinchas, au Pérou, ou Nauru, autre bout de terre du Pacifique, au siècle suivant. Depuis, le stock s'est épuisé à Nauru et l'île, dont le PIB par habitant est le plus élevé du monde dans les années 1990, est maintenant exsangue.

DES RESSOURCES INÉGALEMENT RÉPARTIES

Au XX^e siècle et jusqu'à nos jours, l'écrasante majorité du phosphate est tirée de l'extraction minière. «Tel qu'il est exploité aujourd'hui, le phosphore est une ressource fossile, comme les hydrocarbures», explique Fabien Esculier, chercheur au Laboratoire eau environnement et systèmes urbains (Leesu) à l'École des Ponts Paris Tech. Des conditions géolo-

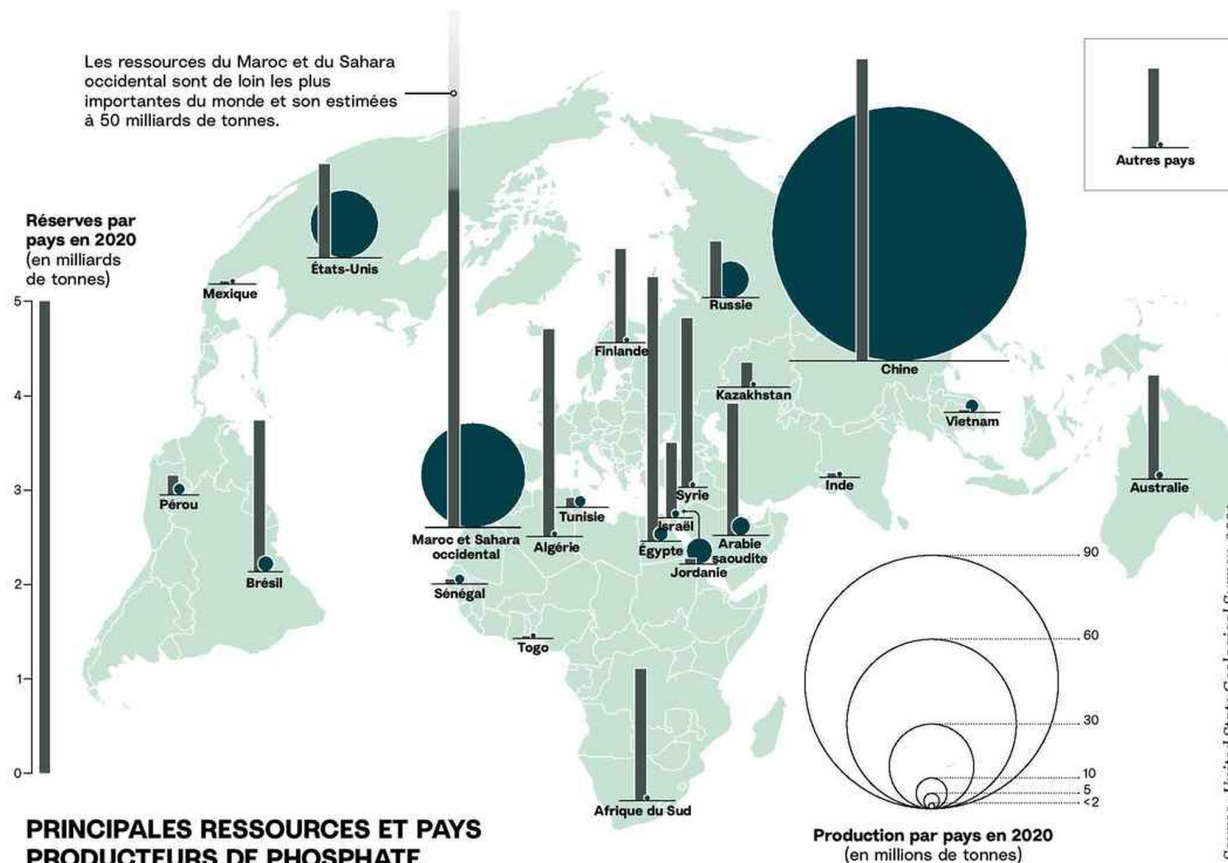
«Nous pouvons remplacer le charbon par l'énergie nucléaire, le bois par le plastique, la viande par la levure et la solitude par l'amitié. Pour le phosphore, il n'y a ni substitut ni remplaçant.»

– Isaac Asimov

giques ont favorisé la sédimentation d'organismes et cela a créé au bout de plusieurs millions d'années une couche très riche en phosphore.» Les zones avec de fortes concentrations sont loin d'être également réparties sur la surface du globe. Pour la plupart, elles se trouvent en Afrique du Nord, en Chine, aux États-Unis, en Russie. Selon le dernier rapport annuel de l'Institut d'études géologiques américain (USGS)², les seules réserves en roches phosphatées du Maroc et du Sahara occidental s'élèveraient à 50 milliards de tonnes, soit 70 % du total mondial. Durant la seconde moitié du XX^e siècle, la production de ces roches a été multipliée par six et, en 2020, elle a atteint 223 millions de tonnes, dont 90 millions rien qu'en Chine.

«Une partie de ce phosphore est utilisée comme détergent et une autre comme additif chimique pour la nourriture, mais 80 % du phosphore extrait est utilisé pour les fertilisants chimiques», souligne Bruno Ringeval, chercheur à l'Institut national de





PRINCIPALES RESSOURCES ET PAYS PRODUCTEURS DE PHOSPHATE

recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) de Bordeaux. Ces engrais de synthèse, employés en masse, ont contribué à façonner l'agriculture moderne post-Seconde Guerre mondiale... et ses excès. En France et dans d'autres pays industrialisés, leur utilisation a atteint son pic dans les années 1970-1980 avant d'accuser une baisse. Julien Némery, chercheur à l'Institut des géosciences de l'environnement (IGE) de Grenoble, en détaille l'une des raisons : « Pendant longtemps, l'idée reçue dans le monde agricole était que plus on mettait de fertilisants, plus on produisait. Après des décennies d'essais, l'Inrae a montré que cette idée était fautive. Il n'y a pas besoin de mettre cinq fois plus d'engrais que nécessaire pour avoir un rendement cinq fois plus élevé. »

L'autre raison expliquant cette diminution est la prise de conscience des problèmes environnementaux provoqués par le recours immodéré aux engrais phosphatés. Si les sols peuvent stocker une partie du surplus de phosphore, une autre partie terminera sa course dans les cours d'eau, du fait de l'érosion et du lessivage des sols par la pluie. En se cumulant avec le phosphore contenu dans les rejets d'eaux usées peu ou non traitées,

ce surplus accentue les phénomènes d'eutrophisation³, avec prolifération des algues vertes à la clé. Mais cette perturbation du cycle du phosphore peut avoir des conséquences bien plus graves, comme une désoxygénation des écosystèmes aquatiques et océaniques, fatale pour la vie marine. « Des événements anoxiques [épuisement d'un milieu aquatique en dioxygène, ndlr] ont déjà lieu dans de nombreux endroits, par exemple en mer Baltique. Une partie des scientifiques n'exclut pas des changements profonds des équilibres biogéochimiques des grands cycles marins menant potentiellement à des anoxies plus fortes », alerte Fabien Esculier. Le risque de voir ces phénomènes se multiplier est encore plus élevé en Chine, en Asie du Sud-Est ou en Amérique du Sud, où la demande en engrais phosphatés a explosé. Cette soif s'explique notamment par une montée en puissance de l'agriculture intensive dans ces régions, ainsi que la part de plus en plus grande occupée dans les régimes alimentaires locaux par les produits d'origine animale qui, rappelle Stuart White, « requièrent cinq à dix fois plus de phosphore que leur équivalent végétal ayant les mêmes caractéristiques nutritionnelles ».





LE PIC À L'HORIZON ?

Avec toujours plus d'êtres humains à nourrir sur notre planète (près de 10 milliards en 2050 selon les projections démographiques de l'ONU établies il y a deux ans), autre facteur faisant grimper la demande en phosphore, une pénurie est-elle à prévoir ? Déjà, dans un message datant de mai 1938, c'est en président inquiet que Franklin Roosevelt demandait aux élus du Congrès de se pencher sur les ressources en phosphore des États-Unis pour assurer «des approvisionnements continus et suffisants [...] au prix le plus bas». Le sujet suscite toutefois un intérêt croissant depuis une dizaine d'années et les travaux menés par Dana Cordell et Stuart White. Dans un article publié en 2009⁴, les deux chercheurs australiens ont situé le pic de production mondiale du phosphore dans un futur très proche, aux alentours de 2030. «Quand nous avons mené ces travaux, nous nous sommes basés sur les informations alors disponibles», souligne Stuart White. Peu après, le Centre international de développement des engrais (IFDC) a corrigé les chiffres des réserves, avec une réévaluation à la hausse vertigineuse pour le Maroc et le Sahara occidental. Même après avoir refait ses calculs, le duo est parvenu à la conclusion que le pic sera passé au cours du XXI^e siècle. Pour l'IFDC, qui n'intègre pas de hausse de la demande en phosphore dans ses estimations, les réserves sont amplement suffisantes pour plusieurs centaines d'années. «Il n'y a pas de pénurie imminente de roches phosphatées», assure pour sa part l'Institut d'études géologiques américain dans son dernier rapport.

INDÉPENDANCE ET CHANGEMENT DE RÉGIME

Au-delà de ces résultats divergents, Bruno Ringeval souligne la difficulté de l'exercice sans une connaissance approfondie de la nature du phosphore disponible. «Il y a des réserves dont la qualité est plus faible, où l'extraction est plus compliquée et plus chère», précise-t-il. Sans parler des considérations géostratégiques compliquant l'accès à la ressource : «Même le phosphore existant peut ne pas être disponible parce que le pays le produisant ne veut pas l'exporter ou augmente ses prix.» En septembre dernier, la Chine a par exemple décidé de geler toutes ses exportations de phosphate au moins jusqu'en juin 2022, contribuant à une hausse du prix des engrais chimiques depuis le début d'année. À plus long terme, l'exploitation des immenses réserves de phosphate au Sahara occidental pose également question. Ce territoire, au statut juridique indéterminé pour l'ONU, est au cœur des tensions entre le

Maroc, qui en contrôle effectivement la majeure partie, et l'Algérie, soutien du Front Polisario qui revendique l'indépendance du Sahara occidental. Même en écartant l'hypothèse de la pénurie, devenir de moins en moins dépendant de l'extraction de roches phosphatées est donc crucial pour les régions ne disposant pas de mines, comme la France et les autres membres de l'Union européenne (UE). En 2014, l'UE a ainsi placé les roches phosphatées comme matière première critique pour son approvisionnement. Quelles seraient les alternatives ? Pour Fabien Esculier, la première des priorités est d'avoir une «logique de sobriété dans les usages», et donc de réduire la quantité de phosphore consommée. «Dans les sociétés occidentales, les habitants mangent beaucoup plus de phosphore que ce dont ils ont besoin», explique le chercheur. En France, le régime alimentaire comprend globalement deux tiers de protéines d'origine animale et un tiers d'origine végétale. Inverser ces proportions aurait un impact très fort sur les produits phosphorés.

L'autre enjeu est celui d'avoir un cycle du phosphore plus vertueux, effectuant plusieurs boucles et non une seule ligne droite aboutissant au fond des océans. Le principal levier pour y parvenir, c'est un recyclage accru des excréments animales ou humaines. Pour les secondes, outre la récupération des boues d'épuration où le phosphore est précipité, cela peut passer par une séparation à la source de l'urine et des matières fécales. «En France, il y a toujours eu des voix pour dire qu'il faut retourner les excréments au sol», note Fabien Esculier, qui a consacré une thèse à ce sujet⁵. Elles ont juste été très peu audibles et marginalisées après la Seconde Guerre mondiale. Ce retour aux pratiques les plus classiques de l'humanité pour valoriser davantage encore notre «or fumier» sonnerait comme une belle revanche pour Victor Hugo, qui écrivait également ceci dans *Les Misérables* : «Vous êtes maîtres de perdre cette richesse, et de me trouver ridicule par-dessus le marché. Ce sera là le chef-d'œuvre de votre ignorance.»

- 1 John Emsley, *The Shocking History of Phosphorus*, Macmillan, 2000.
- 2 «Mineral Commodity Summaries 2021», USGS, janvier 2021.
- 3 Concentration excessive d'un nutriment dans un milieu aquatique.
- 4 Dana Cordell et Stuart White. «The Story of Phosphorus: Global Food Security and Food for Thought», *Global Environmental Change*, vol. 19, n°2, mai 2009, p. 292-305.
- 5 «Le système alimentation/excrétion des territoires urbains : régimes et transitions socio-écologiques», 2018.

