

L'épuisement des ressources minérales et la notion de matériaux critiques

José Halloy

Les ressources minières constituent un stock fini que l'humanité épuise de plus en plus vite. Les modèles montrent que pour un certain nombre d'entre elles, les pics de production pourraient être franchis au cours de ce siècle. La sobriété pourrait donc être l'enjeu de société de notre époque...

L'industrie minière produit en grande quantité des dizaines d'éléments chimiques dont les plus connus sont les métaux classiques tels que le fer, l'or, l'argent, le plomb, le cuivre, l'étain, l'aluminium, le nickel, etc. Les courbes de quantités extraites chaque année depuis le début du XX^e siècle montrent que cette extraction ne cesse de croître, souvent de manière exponentielle. Pratiquement pour tous les éléments chimiques, dont nous disposons des données, le maximum d'extraction se produit aujourd'hui. Nous n'avons jamais autant extrait de ressources minières de toute l'histoire de l'humanité. Ce que montre l'histoire du XX^e et du XXI^e siècles c'est que non seulement cette croissance s'accélère mais aussi que le nombre d'éléments chimiques extraits s'accroît. De nos jours, l'essentiel du tableau périodique des éléments chimiques est mis au travail dans les sciences des matériaux. Ce

fait est parfois qualifié d'extractivisme, c'est-à-dire le processus qui consiste à extraire des ressources naturelles de la Terre pour les vendre sur le marché mondial. Ce modèle économique est devenu populaire dans de nombreux pays d'Amérique latine, mais il prend de plus en plus d'importance dans d'autres régions (voir article sur le lithium ici).

Les minéraux dont sont extraits les éléments chimiques résultent de l'histoire géologique de la Terre. Comme toute histoire elle est contingente et dépend du chemin suivi auparavant. Il est peu probable que cela se reproduise de la même manière dans le futur. Mais si certains processus géologiques pouvaient produire des strates géologiques semblables, ils se dérouleraient sur des millions d'années c'est-à-dire sur des échelles de temps géologiques bien plus longues que l'échelle de temps des civilisations humaines. Les ressources

minières peuvent donc être considérées comme un stock fini dans lequel l'humanité puise de plus en plus intensément.

Épuisement des ressources

L'épuisement de ces ressources est donc une quasi-certitude si l'on ne trouve pas des procédés extrêmement efficaces de recyclage. Pour la plupart des éléments chimiques, les procédés de recyclage ne sont pas connus. Pour les métaux classiques, comme le fer ou le nickel, le taux de recyclage actuel est de l'ordre de 50 %. Ce qui implique que 50 % sont perdus à chaque cycle de vie des produits. L'épuisement n'est donc que retardé, mais gagner du temps est déjà important. La question essentielle qui demeure est donc celle de l'échelle de temps de l'épuisement. S'il se produit au cours du XXI^e siècle ou au cours du troisième millénaire la question n'a pas la même importance en termes scientifiques, technologiques, économiques et sociétaux. Or il semble que le problème de l'épuisement risque de prendre de l'importance et de devenir critique au cours de ce siècle.

Le premier à s'être posé la question en terme moderne est Marion King Hubbert (1903-1989), un géologue et géophysicien américain. Il travaillait au laboratoire de recherche de Shell à Houston, au Texas, terre de pétrole. Il a apporté plusieurs contributions importantes à la géologie, à la géophysique et à la géologie pétrolière, notamment la courbe de Hubbert et la théorie du pic de Hubbert, un concept à la base de la notion de « pic pétrolier », avec d'importantes ramifications économiques. Le modèle du pic de Hubbert dit que pour une zone géographique donnée, d'une région productrice de pétrole à la planète dans son ensemble, le taux de production pétrolière tend à suivre une courbe en forme de cloche. Après une phase de croissance, similaire à une croissance exponentielle, la produc-

tion annuelle ralentit pour atteindre un maximum puis décroît de manière symétrique à la montée. Il existe donc un maximum de production annuelle qui se produit une année spécifique, l'année du pic de production. Ensuite, après ce pic, la production ne peut que décroître. Le modèle de Hubbert avance l'hypothèse que la production cumulée de pétrole au cours du temps suit une courbe logistique, une courbe en forme de S, proche d'une fonction seuil qui, donc, sature pour atteindre un plateau qui ensuite reste constant au cours du temps.

Cette courbe logistique fut proposée par le belge Pierre François Verhulst (1804-1849), élève d'Adolphe Quételet (1796-1874). La question que se posent Verhulst et Quételet est de trouver une réponse mathématique (un modèle) au problème de Thomas Malthus (1766-1834). Dans son célèbre livre, *An Essay on the Principle of Population*, publié anonymement en 1798 pour la première version, Malthus prédisait qu'une augmentation de la production alimentaire d'une nation améliorerait le bien-être de la population, mais que cette amélioration n'était que temporaire car elle conduisait à une croissance démographique qui, à son tour, rétablissait le niveau de production d'origine par habitant. En d'autres termes, l'humanité avait une propension à utiliser l'abondance pour la croissance démographique plutôt que pour maintenir un niveau de vie élevé, une vision connue sous le nom de « piège malthusien ». Les populations humaines avaient tendance à croître jusqu'à ce que la classe inférieure subisse des difficultés et soit plus vulnérable à la famine et à la maladie et souffre d'une « catastrophe malthusienne ». Ce livre met en exergue jusqu'à aujourd'hui une question profonde et compliquée sur le destin de l'humanité avec toutes les conséquences politiques néfastes et mortifères qui lui sont associées.

Il sort du cadre de ce texte de présenter ce débat scientifique qui dure depuis deux-cent-vingt ans. Mais soulignons toutefois que c'est dans ce contexte que Verhulst proposa donc son modèle, dont la solution est la courbe qu'il baptise de « logistique ». Cette courbe présente un plateau, c'est-à-dire que la croissance de la population humaine cesse pour se stabiliser à un maximum qui reste constant au cours du temps. À l'époque, il n'y avait pas suffisamment de données démographiques pour valider le modèle de Verhulst. Cependant, l'idée qu'une dynamique interne à une population, qui n'est donc pas due à une intervention extérieure au système, puisse stabiliser la croissance marqua les esprits et reste un classique valable encore aujourd'hui. Le modèle de Verhulst fut validé expérimentalement pour la croissance des micro-organismes au début du XX^e siècle par le biologiste russe Georgii Frantsevich Gause (1910-1986) et par le biochimiste français, prix Nobel de médecine, Jacques Monod (1910-1976). Ce modèle, simple, est enseigné comme une pierre angulaire de la dynamique des populations.

Dans le cadre de la production de pétrole, Hubbert constate que l'extraction cumulée de pétrole ne peut pas dépasser une certaine valeur, qui correspond à la quantité totale de pétrole existant. Cette quantité maximale est donc la valeur du plateau final de la courbe logistique. Ensuite, Hubbert reprend les hypothèses de Verhulst pour la dynamique de la quantité cumulée de pétrole au cours du temps : après une croissance exponentielle les facteurs limitants entrent en jeu, la croissance se ralentit et se stabilise à la valeur maximale. La production annuelle de pétrole correspond mathématiquement à la dérivée par rapport au temps de la quantité cumulée de pétrole donc de la courbe logistique. Cette dérivée est une courbe en forme de cloche, symétrique

par rapport à son maximum. Après cette production annuelle maximale, la production ne peut que décroître. Il est admis que lorsque ce maximum est dépassé, les contraintes matérielles font que les systèmes socioéconomiques entrent dans des zones de turbulence dues à des pénuries de plus en plus problématiques pouvant mener à des ruptures ou à des effondrements sociétaux.

Échelles de temps

Ce modèle n'est pas à prendre comme pouvant formuler des prédictions précises mais est utile pour estimer des échelles de temps dans un but de prospective. Le modèle dépend de quantités qu'il est souvent difficile d'estimer et qui présentent des incertitudes. Il a été généralisé pour les ressources minérales autres que le pétrole, et on se réfère régulièrement non seulement au « pic de pétrole » mais aussi au « pic de tout ». C'est-à-dire qu'un grand nombre de ressources minérales qui sont exploitées en masse comme le pétrole, suivront des courbes semblables. Déterminer les échelles de temps est essentiel en termes de prospective. L'inquiétude vient du fait que les estimations actuelles pointent vers des pics de production qui pourraient avoir lieu au cours du XXI^e siècle déjà.

Du point de vue socioéconomique, cela signifie que les zones de fortes turbulences, voire d'effondrement pourraient avoir lieu au cours de la seconde moitié de ce siècle. Du point de vue scientifique et technologique, cela veut dire que les défis qui nous attendent sont immenses et urgents. Il faut anticiper l'arrivée des pics de production en trouvant des matériaux de substitution ou des innovations technologiques pour maintenir, une partie au moins, des services offerts par les technologies et les matériaux actuels. Cette réflexion est à replacer dans le cadre du changement climatique et de la nécessaire transition

énergétique. Toutes ces considérations font que la littérature scientifique considérant un effondrement possible des sociétés occidentales croît également.

Nous reste-t-il de l'espoir pour trouver des échelles de temps plus longues en tenant compte des incertitudes sur les données et sur la validité du modèle et du raisonnement ? Est-il possible de faire des substitutions de matériaux pour remplacer ceux qui viendraient à manquer ? Telles sont les questions majeures actuelles en termes de prospective socioéconomique, technologique et scientifique. Ce débat s'intensifie au gré des prises de conscience scientifiques et politiques.

Matériaux critiques

Ces questions sont reformulées sous la notion de matériaux critiques. Au cours de la dernière décennie, des contraintes sporadiques sur la disponibilité de métaux et de métalloïdes essentiels aux technologies modernes ont poussé à des tentatives de mettre fin à la « criticité » relative de divers matériaux pour guider les usages des scientifiques des matériaux et des concepteurs de produits. La « criticité » est définie comme les déséquilibres entre l'offre et la demande, réelles ou anticipées, de métaux et métalloïdes. Conséquence du fait que les technologies modernes dépendent de l'approvisionnement de pratiquement tout le tableau périodique des éléments.

Malgré l'intuition selon laquelle il devrait être simple de désigner un élément comme critique et un autre comme non critique, la détermination de la « criticité » s'avère difficile. En effet, elle dépend non seulement de l'abondance géologique, mais aussi d'une foule d'autres facteurs comme le potentiel de substitution, le degré de concentration géopolitique des gisements de minerais, l'état de la technologie minière, la législation, les initiatives

géopolitiques, l'instabilité gouvernementale et les politiques économiques.

Souvent la « criticité » est estimée selon trois axes : le risque d'approvisionnement, les implications environnementales et la vulnérabilité à la restriction de l'approvisionnement. Jusqu'à la seconde moitié du XX^e siècle, un nombre relativement limité des éléments chimiques était utilisé de manière significative dans les technologies et les limites de ces ressources n'étaient pas considérées comme des sujets de discussion pertinents. La situation a commencé à changer avec la publication aux États-Unis du *Rapport Paley* en 1952, qui suggérait que des limitations de ressources étaient en fait possibles. Dix ans plus tard, une guerre civile en République démocratique du Congo a entraîné une diminution importante, quoique temporaire, de l'offre de cobalt, ce qui indiqua que les préoccupations du rapport Paley pourraient bien être fondées. La guerre au Congo et l'approvisionnement en cobalt demeurent des problèmes aujourd'hui encore. Plus récemment, une diminution des exportations de terres rares par la Chine a entraîné diverses perturbations technologiques en particulier au Japon. De nos jours, pratiquement tous les pays occidentaux importants, produisent des rapports sur la « criticité » des matériaux : par exemple la France, Le Royaume Uni, l'Allemagne, l'Union européenne, les États-Unis, ont produit et mettent à jour ce type de rapport. Les autorités en sont informées.

Quelques données

Nous avons utilisé la méthode de Hubbert pour estimer les pics des productions des éléments chimiques pour lesquels nous disposons de suffisamment de données géologiques et minières. Les résultats sont résumés dans la table page suivante.

Element chimique	Pic (année)	Croûte + Océans (année)
Acier	2070 ± 37	2541
Aluminium	2070 ± 18	2456
Antimoine	2022 ± 10	2239
Argent	2021 ± 11	2204
Arsenic	2062 ± 48	3429
Bore	2052 ± 33	2264
Cadmium	2002 ± 3	2305
Chrome	2117 ± 26	2369
Cobalt	2061 ± 19	2377
Cuivre	2048 ± 4	2389
Étain	2024 ± 5	2434
Gallium	2040 ± 29	2249
Germanium	2113 ± 17	2464
Indium	2043 ± 26	2283
Lithium	2083 ± 31	2316
Manganèse	2083 ± 16	2385
Molybdène	2044 ± 13	2345
Nickel	2032 ± 9	2338
Niobium	2033 ± 22	2288
Or	2020 ± 7	2301
Phosphate	2101 ± 6	2237
Platine	2069 ± 42	2549
Plomb	2092 ± 8	2438
Selenium	2017 ± 8	2368
Tantale	2039 ± 24	2423
Terres rares	2108 ± 40	—
Tellurium	2054 ± 30	2399
Vanadium	2113 ± 30	2629
Zinc	2057 ± 7	2473
Zirconium	2024 ± 16	2384

Sur les 29 (30 avec le fer dans l'acier) éléments chimiques considérés, tous présentent des dates de pics de production au cours du XXI^e siècle. Cette approche à la Hubbert nécessite de connaître les données d'extraction annuelles à partir desquelles il est possible de reconstruire la production cumulée au cours du temps. Ces données sont collectées par des institutions publiques comme le « United States Geological Survey, USGS » américain ou le « Bureau de recherches géologiques et minières, BRGM » français. Ce sont deux organismes publics de référence dans le domaine des sciences de la Terre pour la gestion des ressources et des risques du sol et du sous-sol. Comme toutes les statistiques d'État, elles en présentent à la fois les mêmes qualités et les mêmes défauts. Étant donné le rôle stratégique croissant de certaines ressources, certaines informations ne sont plus publiées par l'USGS, par exemple la production de lithium par les États-Unis. De plus, il faut disposer d'une estimation de la quantité totale de minerais disponibles, donc de la quantité géologique totale disponible de l'élément chimique considéré. Ces estimations combinent les données de l'activité minière ainsi que les estimations géologiques. Une fois ces données déterminées, le reste est un procédé classique d'ajustement de courbe et d'extrapolation.

Il existe donc de nombreuses incertitudes associées à ces données. L'estimation des quantités annuelles d'extraction dépend de la volonté des États de mesurer l'activité minière. Pour des raisons économiques et politiques cette volonté peut prendre des dimensions variables selon les États. L'estimation des réserves, c'est-à-dire de la quantité totale disponible géologiquement présente également d'importantes difficultés. Tout d'abord la notion de « réserve » recouvre différentes définitions : les réserves sont les res-

sources exploitables au « prix actuel » ; les réserves base sont les ressources démontrées, mais non encore « exploitables économiquement » ; les réserves déduites représentent le potentiel géologique identifié, mais non encore exploré dont les quantités sont estimées à partir de projections géologiques.

Comme on le voit le concept de « réserve » inclut des considérations économiques et pas seulement géologiques. Si la géologie est une science, pour l'économie cela reste à démontrer. Ces incertitudes font que ce type d'approche doit être considéré comme plus qualitatif que quantitatif. Mais pour autant, il ne faudrait pas conclure que les incertitudes rendent les prédictions de ce type de modèles inutiles voire complètement fausses. Il est possible de prendre en compte une partie de ces incertitudes et donc d'ajuster les échelles de temps d'épuisement. Il est aussi possible de prendre en considération les réserves ultimes des éléments et de considérer, selon les données géologiques actuelles, les quantités totales disponibles dans toute la croûte terrestre et tous les océans, indépendamment d'arguments économiques, minéralogiques ou de simple faisabilité technique d'extraction. Pour un physicien, cela revient à considérer les « conditions aux limites » : combien de temps nous reste-t-il si nous passons toute la croûte terrestre au tamis et tous les océans au travers d'un filtre pour en extraire tous les éléments chimiques disponibles ? Pas un millénaire... (voir le tableau).

Dès lors, tout semble indiquer que les contraintes d'approvisionnement auront lieu sur une échelle de temps de l'ordre du siècle et pas du millénaire. Cela provient d'une hypothèse essentielle, cruciale, dans le modèle de Verhulst-Hubbert : la croissance est exponentielle au début. L'extrapolation d'une courbe exponentielle mène évidemment

Références

- Alonso E. et al. (2012), « Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies », *Environ Sci Technol*, 46 (6), p. 3406-3414.
- Hanson DJ (2011), « Concern grows over rare-earths supply », *Chem Eng News* 89 (20), p. 28-29.
- European Economic and Social Committee (2017), *Commodity Markets and Raw Materials* (European Commission, Brussels).
- Meadows D. et Randers J. (2012), *The Limits to growth: the 30-year update*, Routledge.
- National Research Council (2008), *Managing Materials for a Twenty-First Century Military*, National Academies Press, Washington, DC.
- Paley WS, Brown GR, Bunker AH, Hodgins E, Mason ES (1952), *Resources for Freedom*, President's Materials Policy Commission, Washington, DC.
- Verhulst P.-Fr. (1838), « Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement », *Correspondance mathématique et physique*, 10, p. 113-121.
- Verhulst P.-Fr. (1845), « Recherches mathématiques sur la loi d'accroissement de la population », *Nouveaux Mémoires de l'Académie royale des Sciences et Belles-Lettres de Bruxelles*, 18, p. 1-42.

très vite à des quantités colossales. C'est d'ailleurs l'argument de Malthus ou encore du rapport de Meadows et al. sur les limites à la croissance (*Limits to Growth*, 1972, 2012). Or pour le moment, nous observons cette croissance d'extraction exponentielle depuis la seconde moitié du XX^e siècle.

Sobriété volontaire

Ce facteur de croissance exponentielle est vital : nous devrions ralentir cette frénésie d'extraction pour éloigner les dates d'épuisement et gagner du temps pour préparer une transition énergétique, climatique et technologique dans des conditions plus favorables à l'humanité. La question de la sobriété est donc la question vitale de notre XXI^e siècle : nous devons construire des sociétés sobres et faire des choix drastiques.

Sinon, les pénuries et les « catastrophes Malthusiennes » auront beaucoup de chance de se produire, le pire est donc probable. De plus, les modèles de type Hubbert négligent, en grande partie, les effets économiques. Ces effets économiques ont une importance cruciale car cette activité frénétique de fabrication de matériaux est due à l'accumulation des richesses. Mais du côté des sciences économiques il n'est pas clair que des modèles puissent être créés pour penser ce type d'échelle de temps.

Quand on constate les maigres résultats des discussions, au niveau mondial, sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre, un certain pessimisme s'installe au regard des enjeux sur les ressources minérales. En tant que scientifique, penser des alternatives technologiques devient cependant crucial, voire vital.