Zeitschrift: Revue économique et sociale : bulletin de la Société d'Etudes Economiques et Sociales

Herausgeber: Société d'Etudes Economiques et Sociales

Band: 32 (1974)

Heft: 1

Artikel: Réserves minières et ressources minérales pour l'avenir

Autor: Woodtli, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-137245

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Réserves minières et ressources minérales pour l'avenir

R. Woodtli
professeur à l'Université de Lausanne

La forme nouvelle de lutte entre pays sous-développés et Etats industrialisés qui est apparue en automne 1973 sous la forme d'une limitation de la production des hydrocarbures et de hausses de prix a rendu l'homme de la rue plus conscient du rôle que jouent dans sa vie quotidienne les substances d'origine minérale; déjà sensibilisé par les menaces qui pèsent sur son milieu naturel et intoxiqué par les contempteurs de la croissance économique, il découvre une pénurie artificielle des produits pétroliers, une hausse de leurs cours et de celui des métaux. Il en vient tout naturellement à se demander si l'approvisionnement de l'industrie est assuré ou si l'humanité va régresser vers l'état qui était le sien avant la première révolution industrielle. Des informateurs parfois plus avides de sensation que de précision contribuent à l'égarer par des exposés fantaisistes sur la capacité de production de notre planète.

Au mois de novembre 1973, on a pu voir sur les écrans de télévision un tableau du genre suivant:

«Consommation mondiale de pétrole: env. 2 milliards de t/an
Réserves mondiales de pétrole: 62 milliards de t
Augmentation de la consommation: 7,2%/an
Conclusion: dans 16 ans les réserves de pétrole seront épuisées
Que ferons-nous après?»

Suivaient quelques explications peu satisfaisantes.

Le spectateur échappait difficilement à la conclusion qu'un avenir bien sombre suivra l'épuisement des réserves susmentionnées.

En réalité, le problème de l'évaluation des réserves minières et des ressources minérales préoccupe en permanence l'industrie minérale qui consacre des sommes énormes à son étude; son importance n'échappe pas à certains gouvernements qui affectent des moyens considérables à cet objet, soit pour des recherches fondamentales sur la distribution des éléments chimiques dans les roches, sur les procédés de valorisation, sur la mise au point de matériaux de remplacement, soit directement pour la prospection des ressources et l'estimation des réserves (en URSS, 4 milliards de $ par an et une armée de 500 000 personnes).

L'exploitation minière a cessé de s'apparenter à une loterie ou à une activité du genre «cueillette» à partir du moment où les «capitaines de mines» de Cornouailles ont saisi la signification du concept de «réserves»; ils ont exprimé cette découverte dans leur langage terrien en disant que «les réserves sont à la mine, ce que le foin est à la ferme» c'est-à-dire une garantie de vie. Mais a-t-on jamais vu des paysans stocker systématiquement plusieurs récoltes annuelles? Ne considèrent-ils pas qu'il suffit de constituer une *réserve* pour assurer la soudure

d'une récolte à l'autre, plus une marge de sécurité, et pour le surplus de compter sur les *ressources* du domaine qu'ils exploitent? La raison et une expérience séculaire confirment toutes deux le bien-fondé de cette manière de faire qui trouve son explication dans des considérations d'ordre technique et économique.

Les mineurs ne procèdent pas autrement et pour les mêmes excellentes raisons. Toutefois, ils ont mis beaucoup plus de temps que les paysans à élaborer et distinguer ces notions différentes de réserves et de ressources. Ainsi, il ne semble pas être question, même implicitement, de réserve dans le célèbre ouvrage de Georgius Agricola «De re metallica»[1], paru en 1556, où l'auteur décrit avec détail et précision les méthodes de prospection et d'analyse des minerais. Un des premiers auteurs qui ait vraiment dégagé les caractères particuliers de l'industrie minière, A.-M. Héron de Villefosse[2], dans son rapport à Napoléon intutulé «De la richesse minérale», exprime avec éloquence que «les mines ne sont point des trésors», mais «un moyen de travail et par conséquent de prospérité publique»; il s'efforce d'établir sur des bases comparables le potentiel industriel des divers Etats européens et voit bien qu'il dépend de leur capacité de production minière (les moyens de transport de l'époque ne permettaient guère d'imaginer le vaste tourbillon de matières premières à travers le monde entier auquel les Japonais nous font assister[3], mais on ne trouve pas dans son œuvre de tentative d'évaluation du tonnage de minerai accessible.

La notion de réserve se dégage progressivement dans la deuxième moitié du XIXe siècle dans les traités d'exploitation des mines, comme une conséquence du progrès technique et de la mécanisation. Pendant des millénaires, l'exploitation des mines a utilisé la force de l'homme et des animaux domestiques et un équipement simple. Mais, dès le XIXe siècle, la demande accrue de minerais (la production minière s'est multipliée par 83 de 1800 à 1910) a conduit à introduire des méthodes d'exploitation en masse. Les problèmes ont commencé à se poser plus clairement; le rendement n'était plus immédiat comme dans les mines d'or artisanales de Californie, d'Australie ou du Yukon, p. ex., mais il fallait consentir des investissements élevés dans des équipements complexes; pour attirer des capitaux et gérer sainement une affaire, il devenait nécessaire de prévoir leur rémunération, d'étaler sur une certaine période l'amortissement du matériel et donc d'évaluer à l'avance la durée minimale de la mine. Pour cela, il fallut procéder à une prospection suffisamment détaillée pour déterminer la quantité et la qualité de minerai exploitable.

Le résultat d'une telle prospection se traduit donc par une estimation de la réserve de minerai exploitable, ce qui nous conduit à une définition fondamentale: *les réserves sont des concentrations (gisements) dans les roches de minerais que l'on peut exploiter pour en tirer des substances utilisables, à l'aide des connaissances techniques acquises, ceci en réalisant un bénéfice dans les conditions économiques actuelles.*

Divers termes de cette définition appelleraient une discussion détaillée qui nous entraînerait trop loin. Il peut suffire de comprendre que le mot «minerai» s'applique ici non seulement

---

1 AGRICOLA, GEORGIUS, 1556: *De re metallica*; traduction anglaise de H. C. Hoover et L. H. Hoover, 1950, 1 vol., 672 p., Dover, New York.

2 HERON DE VILLEFOSSE, A.-M., 1810; *De la richesse minérale*, tome I, 593 p., Paris.

3 WOODTLI, K., 1973; *Le Japon et la conquête minérale*, 1 vol., 168 p., Centre de recherches européennes, Lausanne.

aux substances à l'état solide, mais aussi aux états liquide (huile, eau, mercure natif, p. ex.) et gazeux (hydrocarbures, hélium, vapeur d'eau surchauffée, p. ex.).

Pour leur part, *les ressources englobent la totalité des réserves et des gisements connus ou à découvrir, exploitables ou non dans les conditions économiques actuelles, que ce soit au moyen de techniques connues ou de techniques à inventer.*

Les réserves représentent la part des ressources qui est immédiatement accessible.

Reprenant la comparaison avec la ferme, on dira que les réserves sont le foin dans la grange tandis que les ressources correspondent aux futures récoltes de foin, imprévisibles, dépendant des conditions météorologiques, mais aussi de l'introduction de nouveaux engrais, de nouvelles semences, de nouvelles habitudes alimentaires, de nouvelles techniques agricoles, etc.

L'estimation des ressources implique un choix parmi de nombreuses hypothèses, souvent contradictoires, et ne peut guère conduire qu'à des ordres de grandeur; suivant les hypothèses choisies, cette estimation paraîtra plus ou moins correcte dans un contexte politique, économique, technologique, démographique, philosophique donné. C'est un domaine essentiellement mouvant et soumis à des réajustements incessants. Il suffit parfois d'un changement dans l'une des nombreuses variables pour modifier complètement le tableau que l'on se fait à un moment donné des ressources d'une certaine substance. Les ressources ne sont donc jamais sûres.

Quelques exemples peuvent illustrer ce qui précède.

Chacun sait que la formidable expansion industrielle des Etats-Unis s'est fondée sur leurs énormes réserves de minerai de fer à forte teneur (env. 50%), notamment celles de la « Mesabi range », au NE du Minnesota, à proximité du lac Supérieur. La région des Grands Lacs possède en outre des gisements de charbon d'excellente qualité et jouit de transports par voies d'eau à bon marché. Pendant des décennies le minerai de fer a donc été transporté à proximité des dépôts de charbon où s'étaient installés les complexes sidérurgiques. Dès 1955, environ, la situation se modifia rapidement: la hausse du fret intérieur et l'épuisement des minerais à forte teneur entraînaient une augmentation du prix du minerai indigène rendu sur les hauts fourneaux, tandis que l'aménagement du Saint-Laurent permettait de relier directement la région des Grands Lacs aux mines d'outre-mer. Un fort courant d'importation ne tarda pas à s'établir qui eut pour conséquence d'aggraver la situation des mines indigènes incapables de soutenir la concurrence du Venezuela ou du Labrador dont les minerais titraient plus de 60% de fer. Les recherches entreprises aux Etats-Unis aboutirent alors à la mise au point d'un procédé d'enrichissement des minerais de fer: il consiste dans le concassage et le broyage des minerais pauvres, suivis d'un triage électromagnétique qui permet d'élever la teneur de 20% de fer jusqu'à 65%. Toutefois, le produit ainsi obtenu se présente sous forme d'une poudre inutilisable dans les hauts fourneaux; il faut donc l'agglomérer en granules ou pellettes. Ces diverses installations exigent des investissements supplémentaires considérables, mais elles livrent un produit à haute teneur, de qualité supérieure, très apprécié des métallurgistes, de sorte que ces procédés de préparation se sont répandus dans le monde entier en moins de 10 ans. Sur tout le globe, des gisements de fer considérés comme sans intérêt jusqu'à 1960 sont passés de l'état de ballast à celui de minerai potentiel. En outre, on s'est aperçu que les concentrés de fer pouvaient, avant pelletisation, être transportés sous forme de suspension aqueuse dans des conduites (des « minéraloducs ») beaucoup moins onéreuses à construire et entretenir que des voies de chemin de fer ou des routes. Grâce à cette innovation, de nouvelles mines de fer ont pu être ouvertes dans des régions sous-développées, situées à plusieurs centaines de kilomètres de la mer. Actuellement,

des essais entrepris à l'échelle industrielle visent à transporter à travers l'océan ces minerais à l'état de suspension dense à bord de minéraliers; cela simplifie l'équipement portuaire et accélère les opérations de chargement et de déchargement qui ont lieu par simple pompage comme pour le pétrole. L'usine de pelletisation s'installe alors non plus sur la mine mais à proximité du haut fourneau. Ce procédé de transport rendra exploitables des gisements de fer dans des régions dépourvues de combustibles et où l'installation de ports minéraliers s'avère quasiment impossible (Madagascar, p. ex.).

Examinons maintenant le cas exemplaire de l'Australie. Jusque vers 1960, ce continent était considéré comme mal pourvu en ressources minérales, ce qui trahissait des investissements insuffisants dans la prospection de ce vaste territoire.

Considérons les statistiques de production suivantes, en notant que 1972 fut une mauvaise année pour les mines australiennes à cause des difficultés économiques du Japon, son principal client.

Production australienne en milliers de tonnes

	Houille	*Lignite*	*Bauxite*	*Minerai de fer*
1962	24 000	17 000	50	4 750
1972	59 300	23 000	14 000	61 000

En 1938, les réserves de fer étant estimées à environ 250 millions de tonnes, le Gouvernement australien mit l'embargo sur le minerai de fer dont, pourtant, les exportations n'atteignaient pas 0,5 million de tonnes par an. Actuellement, avec des réserves dépassant 10 milliards de tonnes de métal récupérable, l'Australie est devenue un gros exportateur qui, en 1971, par exemple, a vendu 41 millions de tonnes au Japon.

Simultanément, des réserves d'hydrocarbures et de nouveaux gisements de charbon ont été découverts et les dépôts de bauxite mis en valeur, grâce à un gros effort de prospection facilité par une situation politique stable et des conditions économiques et fiscales avantageuses.

Une étude récente sur l'approvisionnement du monde occidental en uranium conduit notamment aux conclusions suivantes:

- on compte en moyenne 8 ans pour effectuer une prospection détaillée des réserves, établir une usine-pilote, conduire les essais de traitement, installer la mine, construire l'usine définitive et tous les autres aménagements. Donc, il faut connaître les réserves au moins 8 ans avant de les mettre à contribution;
- les réserves doivent être suffisantes pour permettre d'effectuer les investissements nécessaires et pour garantir l'existence de la mine pendant 10 ans au moins.

Par conséquent, l'état souhaitable des réserves à un moment donné correspond à un tonnage d'uranium en place, exploitable, représentant dix fois les besoins annuels huit ans plus tard.

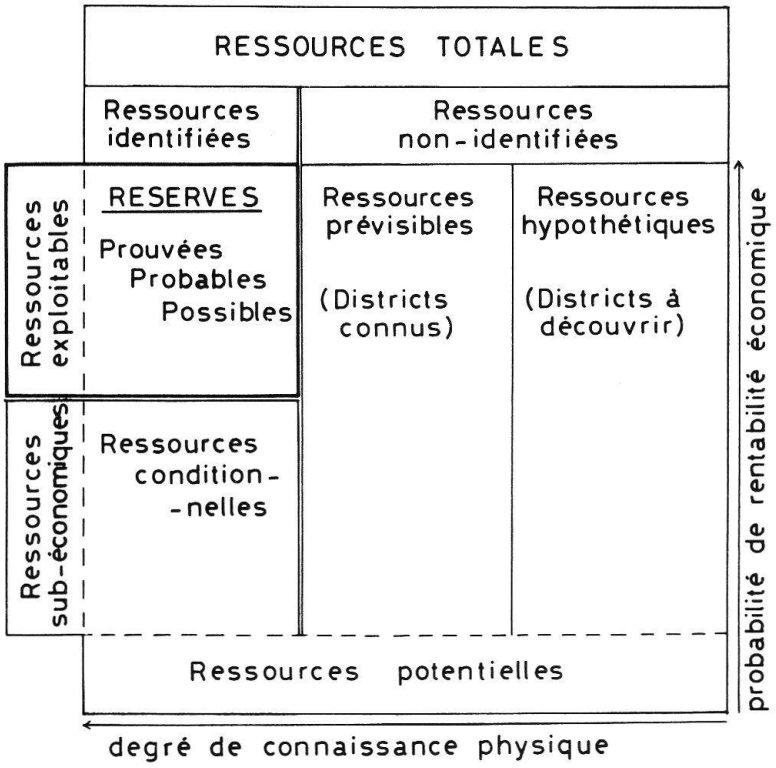
Les considérations et les exemples qui précèdent montrent clairement qu'une distribution d'éléments chimiques ou de minéraux doit remplir certaines conditions pour être considérée comme une ressource d'abord et ensuite pour entrer dans la catégorie des réserves.

La première condition, de nature *géologique*, c'est l'existence même d'une concentration; dans l'état actuel des choses, c'est une condition nécessaire mais non suffisante; puis intervient l'aspect *technique*: il faut connaître, ou tout au moins pouvoir élaborer, les moyens permettant d'extraire le matériau désiré du minerai éventuel; nous trouvons ensuite le facteur *économique*, décisif en général: le minerai doit atteindre le marché à un prix qui permette au producteur de réaliser un bénéfice.

Des événements récents ont montré qu'il faut tenir compte aussi de la possibilité d'accéder au minerai, qui peut être limitée par des conditions *politiques*.

On voit par là que les ressources doivent être estimées en fonction de facteurs multiples que l'on rangera dans deux classes: les facteurs physiques et les facteurs économiques[1]. Parmi les facteurs physiques, on trouve l'emplacement (notamment la profondeur), le volume, la teneur, la composition minéralogique, la concentration en impuretés utiles (co-produits, sous-produits) et nocives, la nature et les propriétés mécaniques des roches. Les facteurs économiques comportent les investissements de nature diverse, les frais de marketing, les taxes et impôts, etc.

En tenant compte de ces deux groupes de facteurs, on peut représenter assez clairement les diverses catégories de ressources sur le schéma suivant.



[1] MCKELVEY, V.-E., 1973; «Mineral resources estimates and public policy», in *U.S. Mineral resources*, p. 9-19, U.S. Geological Survey, professional paper 820.

La flèche horizontale représente le degré de connaissances physiques et la flèche verticale le degré d'exploitabilité, autrement dit la probabilité de créer une exploitation bénéficiaire. Ce mode de représentation permet un classement assez facile des ressources en plusieurs catégories.

On distinguera d'abord les *ressources identifiées* et les *ressources non identifiées*. Les ressources identifiées comportent les roches minéralisées dont l'existence et la situation sont connues de manière certaine: leur masse, leur teneur et leurs autres propriétés peuvent demeurer plus ou moins indéterminées. Une partie d'entre elles ont fait l'objet de recherches suffisamment détaillées pour qu'on en établisse, outre la position, le volume, la teneur, etc, avec un degré de précision avancé. On peut les faire entrer alors dans la catégorie des *réserves*.

Les réserves apparaissent en haut à gauche de la figure, dans le domaine où coïncident le maximum de connaissances physiques et le plus haut degré de probabilité de rentabilité économique. Toutefois, même les réserves ne sont pas connues physiquement de manière homogène et suffisante dans toute leur masse, de sorte que l'on introduit des subdivisions: les *réserves certaines (ou prouvées)* sont immédiatement exploitables dans les conditions économiques et techniques actuelles; leur localisation, leur tonnage, leur teneur, leurs diverses propriétés sont déterminées avec une bonne précision; les *réserves probables* demeurent incomplètement explorées; les informations réunies à leur sujet permettent de conclure à la probabilité de les exploiter; quant aux *réserves possibles*, on en a une image floue et imprécise.

Dans une mine en exploitation, surtout une grande mine, il ne serait pas justifié économiquement de prospecter le gisement de manière détaillée dans toutes ses parties; on commence par s'en faire une idée approchée au moyen de travaux peu denses[1], puis on resserre les ouvrages de prospection dans les secteurs les plus intéressants de manière à délimiter une masse de minerai à bonne teneur en quantité suffisante pour permettre à la mine de démarrer dans des conditions économiquement saines. En général, les réserves certaines représentent 5 à 8 ans de production annuelle, les réserves probables correspondent à 10 à 20 ans d'exploitation.

Chaque année, de nouveaux travaux de prospection exécutés dans des secteurs encore incomplètement explorés permettent de définir de nouvelles réserves certaines aux dépens des réserves probables. Le processus de reconstitution et d'inventaire des réserves se produit donc de façon continue.

Les statistiques de réserves qui paraissent périodiquement dans les journaux et suscitent souvent des commentaires alarmés se rapportent en général à la somme des réserves certaines et probables des gisements d'une région ou du monde entier; on vient de voir que ces réserves sont déterminées pour les 15 à 25 années à venir. Losqu'on lit que les réserves mondiales de cuivre représentent 21 ans de production, cela correspond à une situation normale et saine. Cela ne signifie nullement que la production cessera une fois ces réserves épuisées.

Remarquons en outre que les données publiées par les compagnies minières ne reflètent pas nécessairement la réalité; pour des raisons fiscales, boursières ou concurrentielles il peut leur paraître avantageux de modifier leurs réserves avouées.

Quant aux réserves possibles, elles sont destinées à se transformer au cours des ans en réserves probables puis en réserves certaines.

---

1 WOODTLI, R., « La prospection minière », 22 p., *Revue économique et sociale*, 1960 (juillet), Lausanne.

Ces 3 catégories de réserves sont la seule partie des ressources totales qui sont suffisamment connues à la fois sur les plans physique et économique pour être jugées exploitables avec profit dans un avenir proche.

A propos des réserves, il convient de faire encore les remarques suivantes:

- pour certaines substances (fer, aluminium, charbon, gypse, calcaire, p. ex.) on connaît des réserves suffisantes pour plusieurs siècles; cela ne résulte pas d'une politique d'approvisionnement à long terme, mais provient du mode de gisement et du mécanisme de concentration de ces matières premières qui font qu'on a pu les localiser très facilement, quelquefois sans même les rechercher; ce qui vaut pour elles, ne s'applique pas nécessairement à d'autres substances;
- en effet, la recherche minière coûte très cher et il n'est pas justifié économiquement pour une entreprise (ni même stratégiquement pour un Etat) de prospecter des ressources un demi-siècle à l'avance ou d'explorer complètement tout un territoire;
- les tonnages de réserves comptabilisées dépendent de la teneur-limite à l'exploitation et cette dernière découle des conditions du marché et des connaissances techniques. Les techniques évoluent constamment et, à prix constant, abaissent les coûts de production ce qui permet la mise en exploitation de gisements plus pauvres ou plus éloignés, comme on l'a vu plus haut pour le fer;
- si les réserves diminuent, le minerai devient plus rare, donc son prix de vente tend à augmenter ce qui stimule la recherche de nouveaux gisements;
- on constate que lorsque la teneur moyenne s'abaisse arithmétiquement, le tonnage augmente géométriquement (loi de Blondel et Lasky), ce qui est dû à la forme mathématique de la loi de répartition statistique des teneurs (distribution log-normale). Un bon exemple est fourni par le cuivre; au siècle dernier, on exploitait de petits gisements titrant 5 % de métal en moyenne; actuellement, la teneur moyenne de certains gîtes s'est abaissée jusqu'à 0,5 %, mais le volume du gisement dépasse parfois 1 milliard de tonnes; des exploitations récentes en Colombie britannique attaquent des réserves à 0,2 % et l'on prévoit que l'on pourra un jour tirer parti de roches ne contenant que 0,05 % de cuivre. Bien évidemment, le volume de roches à 0,05 % de cuivre est incomparablement plus grand que celui à 5 %.

Naturellement, au cours de la prospection on rencontre des concentrations minérales qui ne sont pas exploitables dans les conditions actuelles: teneur insuffisante, trop grande profondeur du gisement, composition chimique ou minéralogique complexe ne permettant pas un traitement efficace du minerai avec les techniques en usage, par exemple. Actuellement sub-économiques, ces concentrations peuvent devenir exploitables d'un moment à l'autre à la faveur d'un changement de cours, de l'invention d'un nouveau procédé, de la création d'un nouveau marché; leur sort dépend donc des fluctuations économiques et des progrès techniques. Il suffit d'un changement dans les conditions économiques ou techniques pour qu'elles deviennent exploitables. On les appellera *ressources conditonnelles.*

Les gisements de fer à basse teneur cités précédemment nous offrent plusieurs exemples de progrès techniques aptes à faire passer des ressources conditionnelles dans la catégorie des réserves; la hausse importante du cours de l'or survenue au cours des dernières années a permis de remettre en marche plusieurs mines qui avaient été fermées à cause d'une teneur trop basse; la hausse du prix des hydrocarbures permet d'envisager l'exploitation des schistes bitumineux de l'ouest américain.

Mentionnons un exemple en devenir emprunté à l'industrie de l'aluminium. Le procédé Bayer-Hall actuellement en usage présente divers inconvénients: investissements considérables, consommation élevée d'énergie, production d'effluents nuisibles à l'environnement, exigence de bauxite, minerai qui se forme dans des conditions climatiques particulières à partir de roches favorables ce qui limite sa distribution.

Des études récentes permettent de concevoir une nouvelle technique, le procédé Toth grâce auquel, dit-on, l'investissement, dans les usines serait réduit de 50 à 75%, la consommation d'énergie diminuée de 90%, le prix de revient abaissé de 50%, la pollution supprimée (sous ses formes actuelles); en outre, ce procédé se passerait de bauxite et s'appliquerait à toute roche alumineuse, comme les argiles si abondantes, et livrerait divers sous-produits utiles.

Une société s'efforce de réunir des capitaux afin d'entreprendre des essais à l'échelle industrielle. Il se pourrait donc que dans une dizaine d'années la structure de l'industrie de l'aluminium et la distribution de ses sources d'approvisionnement subissent une révolution.

Inversement, des mesures fiscales, des inventions techniques, un changement de mode parfois, peuvent faire retomber des réserves dans la catégorie des ressources conditionnelles; ces ressources existent toujours et subsistent dans les inventaires mais sont devenues sub-économiques. Les exemples ne manquent pas; citons le cas des nitrates du Chili que ce pays fournissait au monde entier avant la Première Guerre mondiale; coupée des sources de ravitaillements par les hostilités, l'Allemagne a mis au point un procédé de production par synthèse qui s'est répandu ensuite partout et jamais le Chili n'a retrouvé ses marchés; les dépôts de nitrates chiliens attendent des jours meilleurs. Dès la fin du XIXe siècle, l'Inde a joui d'un véritable monopole sur le marché mondial du mica, minéral essentiel pour l'électrotechnique; ce commerce a augmenté au taux de 5%/an pour le tonnage et 12,4%/an pour la valeur jusqu'en 1964, année où le Gouvernement indien imposa un prix minimal et réglementa le trafic; deux ans plus tard, il porta les taxes ad valorem à 40%; ces mesures entraînèrent une profonde modification du marché; actuellement, l'Inde a fermé un grand nombre de chantiers, de nouveaux fournisseurs ont surgi ailleurs et des produits de remplacement, couvrant 16% des besoins, ont fait leur apparition. L'industrie minière est une plante sensible qui exige certains ménagements que négligent trop souvent les hommes politiques.

Réserves de toutes catégories plus ressources conditionnelles constituent les ressources identifiées. A côté de ces dernières sommeillent les ressources non identifiées dont certaines apparaissent comme prévisibles et d'autres demeurent encore hypothétiques. La prévision se fonde nécessairement sur les connaissances géologiques et sur la densité des prospections effectuées.

Les ressources prévisibles se rapportent aux extensions vraisemblables des zones minéralisées déjà connues, mais incomplètement explorées. Les exemples de ce genre ne manquent pas; citons d'abord des cas où la théorie s'est déjà vérifiée: la république d'Irlande, abandonnée par les mineurs au milieu du XIXe siècle, a connu dès 1960 un regain de prospection (dû à des conditions financières et fiscales favorables) qui a conduit à la découverte de gisements où opèrent actuellement quelques-unes des plus importantes mines européennes de cuivre, plomb et zinc; mentionnons les gisements d'hydrocarbures de la mer du Nord; rappelons le retournement de situation pour le fer en Australie. Parmi les prévisions raisonnables on peut inscrire la découverte de nouveaux gisements de cuivre au Zaïre, en Zambie, en Angola, de cuivre en Amérique dans la zone andine, de bauxite en Afrique

occidentale, de manganèse, de fer, de diamant au Brésil, d'or et de fer au Venezuela, de diamant en Afrique australe, d'uranium en Australie. Il y a aussi les ressources sous-marines dont certaines peuvent même s'inscrire dans les ressources conditionnelles.

Quant aux ressources hypothétiques, elles dépendent de la découverte de nouveaux districts analogues géologiquement aux districts actuels, de l'identification de types nouveaux de gisements, de l'invention de moyens d'investigation, de techniques de traitement plus élaborées, de besoins nouveaux. Dans un sens, toute l'histoire de l'industrie minière démontre la validité de ce concept. On se bornera à citer quelques exemples récents comme les découvertes d'hydrocarbures en Afrique du Nord [1] et au Nigéria, en Alaska, en mer du Nord, de tungstène au Canada, de nickel en Australie, de cuivre dans les îles du Pacifique, de diamant en Sibérie.

On peut même prévoir qu'une large partie de ces ressources hypothétiques se trouvent dans la zone tropicale et dans la zone boréale, ainsi que dans et sous les océans.

Ressources conditionnelles, prévisibles et hypothétiques représentent les ressources potentielles. La somme des réserves et des ressources potentielles donne les ressources totales.

Les concepts de réserves et de ressources ayant été définis et éclairés, on peut apporter des précisions sur le volume des ressources de diverses substances.

Auparavant, interrogeons-nous sur le volume des besoins pour le prochain demi-siècle, par exemple.

La plupart des «prévisions» se fondent sur une extrapolation à taux constant de la population mondiale et de la consommation individuelle, en prenant comme limite supérieure de cette dernière les observations effectuées aux Etats-Unis.

Les statistiques montrent que depuis 1950, la production minière augmente d'à peu près 5% par an, ce qui signifie le doublement en 14 ans. A accélération constante, cela représente la multiplication par 130 à 140 en cent ans. En réalité, il n'y a aucune raison d'extrapoler la tendance actuelle; on constate au contraire que la consommation tend à se stabiliser et même à décroître à partir d'un revenu individuel moyen de l'ordre de 2000 $ par an. Cela signifie que les besoins des pays industrialisés croîtront de moins en moins vite. D'autre part, rien ne prouve que les besoins des pays en voie de développement suivront les taux observés aux Etats-Unis.

Avant d'atteindre des taux de consommation élevés, les grandes régions en voie de développement comme la Chine, l'Inde, l'Amérique du Sud devront fortement s'industrialiser, c'est-à-dire mettre très fortement à contribution leur sous-sol. Or, la production minière de l'Inde représente environ 207 $/km^2 contre 10 000 $/km^2 en Allemagne occidentale. Combien se passera-t-il d'années avant que l'Inde multiplie son rendement minier par 50? Probablement beaucoup plus de 50 ans.

En outre, si l'expansion démographique mondiale continuait à se poursuivre exponentiellement (au taux de 2% par an cela conduirait à 26 milliards d'habitants sur la planète en 2070), l'humanité rencontrerait préalablement d'autres problèmes beaucoup plus graves et plus difficiles à résoudre que ceux de son approvisionnement en minerais.

---

1 WOODTLI, R., 1961; *Le potentiel minéral africain*, 1 vol., 302 p., Centre de recherches européennes, Lausanne.

En effet, les travaux des géochimistes ont permis d'établir avec une précision acceptable la distribution des éléments chimiques dans les diverses catégories de roches terrestres, ainsi que la part de ces diverses roches dans la constitution de l'écorce terrestre. A partir de tables de moyennes, on peut se livrer à une série de supputations sur les tonnages de diverses substances.

M. F. Callot[1], par exemple, fournit les chiffres suivants:

Quantité de métaux contenus dans les roches ignées et cristallophylliennes de l'écorce terrestre et dans la mer

Métal	Dans la croûte terrestre		Dans la mer		Durée des ressources en millions d'années au rythme actuel
	Teneur g/t	Tonnage Tt	Teneur g/t	Tonnage Tt	
Aluminium	81 300	15 000	0,1	0,14	1500
Chrome	200	36	–	–	20
Cuivre	70	12,7	0,2	0,28	2
Etain	40	7	–	–	25
Fer	50 000	9 000	2	2,80	25
Manganèse	1 000	180	5	7	25
Or	0,005	0,001	0,004	0,006	3,5
Plomb	16	3	–	–	1
Uranium	4	0,8	1,5	0,2	100
Zinc	132	24	5	7	6

Pour apprécier ce tableau, il convient de préciser les points suivants: les teneurs moyennes sont exprimées en grammes par tonne (g/t), les tonnages en teratonnes (Tt) soit 10^{12} tonnes, ou mille milliards de tonnes. La croûte terrestre est envisagée jusqu'à une profondeur de 2000 m, et sans tenir compte des roches sédimentaires qui contiennent des tonnages énormes d'aluminium et de fer par exemple.

On pourrait citer d'autres exemples de calculs de ce genre, fondés sur des hypothèses différentes; on a proposé aussi diverses formules empiriques qui lient la fréquence d'un élément chimique dans la croûte terrestre aux réserves exploitables de cet élément dans un territoire bien exploré; les résultats de ces estimations concordent toujours pour indiquer des tonnages de substances à proprement parler inimaginables et inépuisables à l'échelle de l'humanité.

Cela n'empêche pas que la recherche et l'étude des ressources minérales doivent se poursuivre assidûment pour découvrir de nouveaux gisements, de nouveaux procédés de mise en valeur, de nouveaux usages. C'est à ce prix seulement que les réserves demeureront à un niveau suffisant.

Pour beaucoup d'éléments chimiques, les applications futures dépendent plus étroitement des progrès techniques que des travaux des prospecteurs. En effet, alors que la prospection découvre des gisements de manière individuelle, les innovations techniques modifient les données d'ensemble et accroissent la somme des ressources potentielles sur tout le globe d'un seul coup, en créant de nouvelles possibilités d'utilisation. Si l'on fait confiance au génie inventif de l'homme, au fond il n'existe pas de problème d'approvisionnement.

[1] CALLOT, F., 1971; «L'avenir de l'approvisionnement mondial en minerais», *Annales des Mines*, décembre, p. 11-20.

Cette conclusion s'oppose de façon flagrante aux conceptions de certaines publications récentes qui mettent l'accent sur le fait que les ressources minérales ne se renouvellent pas, que la terre possède des dimensions finies, d'où découle l'affirmation que le stock de matières premières d'origine minérale est nécessairement fini. On peut rétorquer à ces arguments que certains processus de concentration demeurent actifs et engendrent de nouveaux gisements minéraux. Il s'agit là toutefois de phénomènes très lents et l'on peut admettre que pratiquement la plupart des gîtes ne se reconstituent pas. Inversement, ces ressources théoriquement finies atteignent un volume tel, qu'elles sont pratiquement illimitées. Par ailleurs, pour beaucoup d'entre elles, leur emploi n'entraîne pas une destruction mais une redistribution accompagnée souvent d'une concentration; en réalité, l'homme déplace et réarrange les éléments chimiques d'une manière plus commode pour lui. C'est la raison pour laquelle certains auteurs prétendent que les déchets représentent de nouveaux « gisements ». En fait, les métaux de « seconde fusion », provenant de récupération, constituent déjà un appoint très important, appelé vraisemblablement à augmenter. La limite dans cette direction dépend du prix de revient des métaux récupérés comparé à celui des métaux neufs.

En effet, la récupération constitue une opération onéreuse (collecte, transport, traitement) et présente de difficiles problèmes techniques (existence d'alliages de composition chimique complexe). Le recyclage des matériaux devrait être envisagé d'une manière différente.

On craint parfois que l'élévation des coûts de production porte un coup très grave à l'industrie minière et prive l'industrie de ses approvisionnements. Etant donné l'interdépendance toujours plus étroite des diverses parties du globe, ce facteur ne joue guère de rôle dans la mesure où tous les concurrents en subissent les effets de manière analogue. Les statistiques montrent que la production minière mondiale représente moins de 4% du produit intérieur brut. Cette proportion confirme ce que disait Héron de Villefosse déjà cité: les mines sont des moyens de travail et non des trésors dans lesquels il suffit de puiser. Une augmentation de la part des matières premières réduirait quelque peu la capacité de production mondiale, c'est-à-dire que le niveau de vie s'élèverait moins rapidement qu'à prix constant. Serait-ce un grand mal?

Les problèmes d'approvisionnement en hydrocarbures suscitent évidemment de graves difficultés à court terme, mais ne contredisent pas ce que nous avons démontré pour les ressources minérales en général.

Les ressources en hydrocarbures et en charbon demeurent suffisantes pour longtemps; le vrai problème c'est que leur utilisation pour la production d'énergie calorifique représente un gaspillage qu'il est criminel de tolérer si longtemps. Ces matériaux nobles devraient servir à préparer des produits élaborés, complexes, aux qualités irremplaçables. D'autres sources d'énergie peuvent être mises à contribution et l'on ne fera pas ici un exposé sur les possibilités de production de l'énergie nucléaire. Il suffit de savoir que les ressources en matières radioactives couvrent les besoins pour des millions d'années, à condition de développer les techniques nécessaires.

Deux aspects méritent encore au moins une brève mention:

- la crise de l'énergie qui nous menace ne réside pas dans la pénurie d'approvisionnement, mais dans le bilan thermique de la planète; le développement industriel signifie une déperdition d'énergie thermique dans une atmosphère déjà perturbée par diverses influences. Dans quelques années ou quelques décennies ne surviendra-t-il pas un

changement d'équilibre, une modification du milieu physique terrestre préjudiciable à l'homme? Les problèmes qui se poseront alors paraissent plus difficiles à résoudre que ceux du prix ou du volume des approvisionnements en matières premières;

- la considération précédente souligne le danger majeur suscité par l'exploitation de volumes énormes de minerais à basse teneur, c'est celui de l'atteinte au milieu: on estime que le volume de minerai extrait annuellement vers la fin du siècle pourrait approcher 100 milliards de tonnes, soit environ 40 km^3. Par rapport à la masse de la planète, ce volume est insignifiant mais il sera prélevé essentiellement à fleur de terre, c'est-à-dire au niveau le plus sensible, le plus propre à souffrir et à connaître des perturbations. Quels stigmates cela ne laisserait-il pas à la surface de la planète? Comment cela affecterait-il la flore, la faune, les nappes phréatiques? Quel sera par ailleurs la conséquence des explosifs nucléaires?

L'étude et la prévention des dangers divers que l'on prévoit ou pressent constituent un devoir qu'il ne faut plus retarder.

★

COMMENT CONCLURE?

Il me paraît que dans sa course au progrès l'humanité a atteint le seuil d'une zone dangereuse, ceci dit sans verser dans le catastrophisme ou la hantise du bimillenium.

Au cours de son histoire déjà longue, l'homme a vécu de manière relativement équilibrée avec son milieu naturel, sans trop souffrir des modifications et des contaminations de son biotope. Mais, dès la seconde moitié du XXe siècle, les effets cumulés de la croissance exponentielle de la population et du développement industriel sollicitent de manière exagérée les ressources naturelles et entraînent une altération du milieu qui semble se propager rapidement (pollution de l'atmosphère et des eaux, notamment) et de nature à provoquer de graves menaces à plus ou moins brèves échéances.

Se fondant sur les résultats de calculs basés sur l'hypothèse d'une croissance exponentielle des besoins, certains auteurs proposent de limiter ou même de stopper la croissance industrielle sous prétexte de pénurie prochaine de matières premières minérales. Ces craintes sont injustifiées et l'on peut affirmer que les limites à la croissance ne se trouvent pas dans les facteurs géologiques ou techniques. Il peut apparaître souhaitable de modérer la croissance ou, mieux, de réaliser un développement concerté à l'échelle mondiale. Cela ne doit pas être pour économiser les ressources, mais pour sauvegarder le milieu naturel, base de notre existence, pour préserver certaines valeurs, pour obtenir une meilleure distribution de la richesse et assurer une plus large équité sociale.