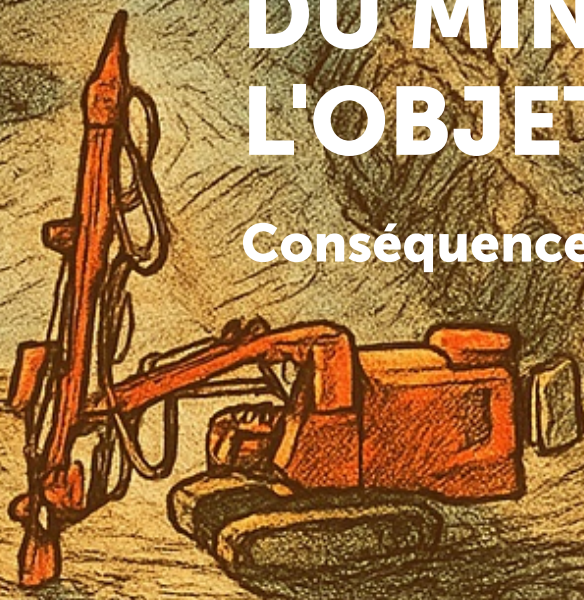




Collection de Minéraux  
SORBONNE UNIVERSITÉ

# DU MINÉRAL À L'OBJET TECHNIQUE

Conséquences de l'extraction minière





# **DU MINÉRAL À L'OBJET TECHNIQUE**

**Conséquences de l'extraction minière**

# Présentation

## Catalogue

Cet ouvrage est associé à la malle pédagogique "Impacts" développé au sein de la Collection de minéraux de Sorbonne Université dans le cadre de l'Appel à Initiative Jeune Public 2024.

## Auteur.e.s :

Mathieu CHASSE et Paola GIURA (IMPMC)

## Mise en page :

Céline PALETTA (BSU)

## Coproduction :

Direction des Relations Science Culture Société (DRSCS) ;  
Pôle Collections Scientifiques et Patrimoine de la Bibliothèque de Sorbonne Université (BSU) ;  
Institut de Minéralogie de Physique des Matériaux et de Cosmochimie de Sorbonne Université (IMPMC)

## Boite pédagogique "Impacts"

La boite pédagogique est conçue comme un support de sensibilisation, de réflexion et d'échanges sur l'exploitation des ressources et leurs impacts, présents et futurs, sur l'environnement et la société.

Il s'agit d'un outil, support d'enseignement et de médiation, destiné aux enseignants

des classes de 1<sup>er</sup>, de terminales et de 1<sup>er</sup> année universitaire. Elle peut donc être empruntée, présentée en classe en amont ou à la suite d'une visite au musée.

## Objectifs pédagogiques :

Montrer la face cachée des objets qui nous entourent ;  
Susciter le dialogue et une réflexion de fond sur les enjeux sociétaux et environnementaux de l'extraction minière ;  
Aborder les potentielles alternatives.

## Contenu de la boite :

Livre *Du minéral à l'objet technique*  
Kakemono  
Maquettes  
Echantillons de minéraux  
Jeu de carte *Débat mouvant*  
Livret-jeu *Visite au musée*

## Conception:

Paola GIURA (IMPMC)

## Coordination:

Léa SORLI (DRSCS)

## Graphisme:

Alice DAURON  
Lycée Vernant, Sèvres. Section supérieure de design graphique.

# Table des matières

---

La face cachée de notre consommation	p.7
Des minéraux, pour quoi faire ?	p.10
Diversification des usages des « métaux »	p.16
Croissance exponentielle de la consommation	p.19
Processus géologiques et concentration des éléments à des niveaux exploitables	p.21
Processus géologiques de concentration imparfaits : extraction et traitement du minerai	p.25
Conséquences environnementales des faibles concentrations et des procédés miniers	p.28
Conséquences socio-économiques	p.32
Approvisionnement en ressources minérales : finitude des ressources et nouveaux horizons extractifs	p.36
Le retour de la mine en France	p.41
Besoin ou demande, la question des modes de vie	p.45
Bibliographie	p.50



*Améthyste, Brésil.  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*

## La face cachée de notre consommation

Nous utilisons au quotidien une vaste gamme d'objets technologiques plus ou moins complexes. Rarement nous nous interrogeons sur leur mode de fabrication et les matériaux qui les composent. Pourtant, ces matériaux sont le résultat de multiples transformations de ressources minérales qui se trouvent dans notre environnement naturel. Cet ouvrage nous invite à prendre la mesure des conséquences environnementales et sociétales de l'extraction minière, première étape du long et complexe processus qui permet de passer du minéral à l'objet technique.

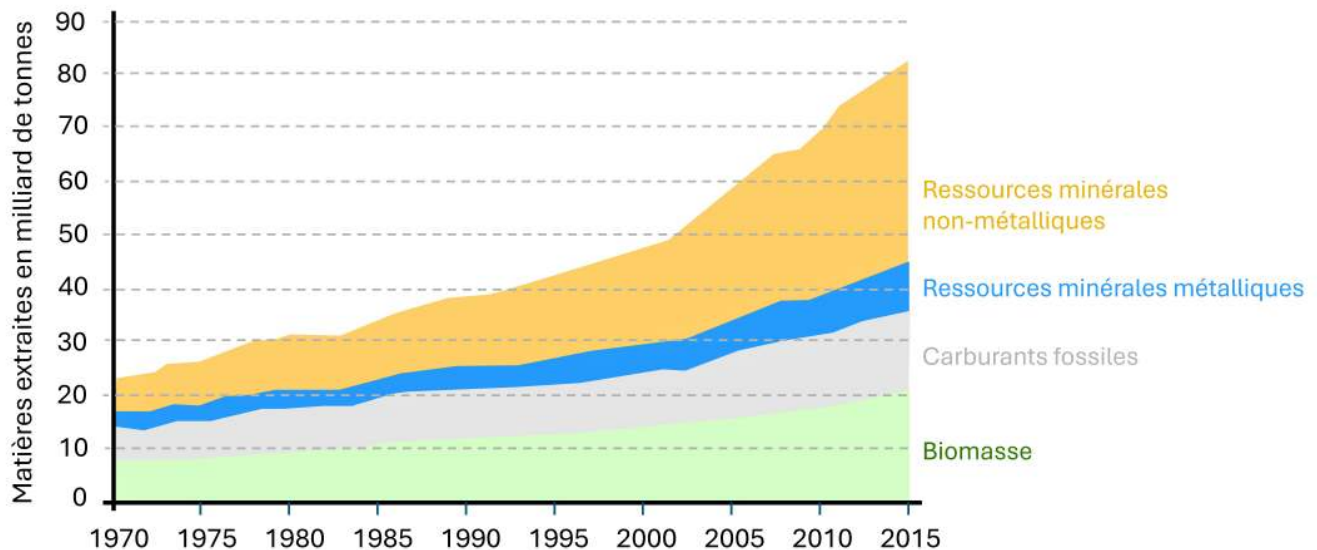


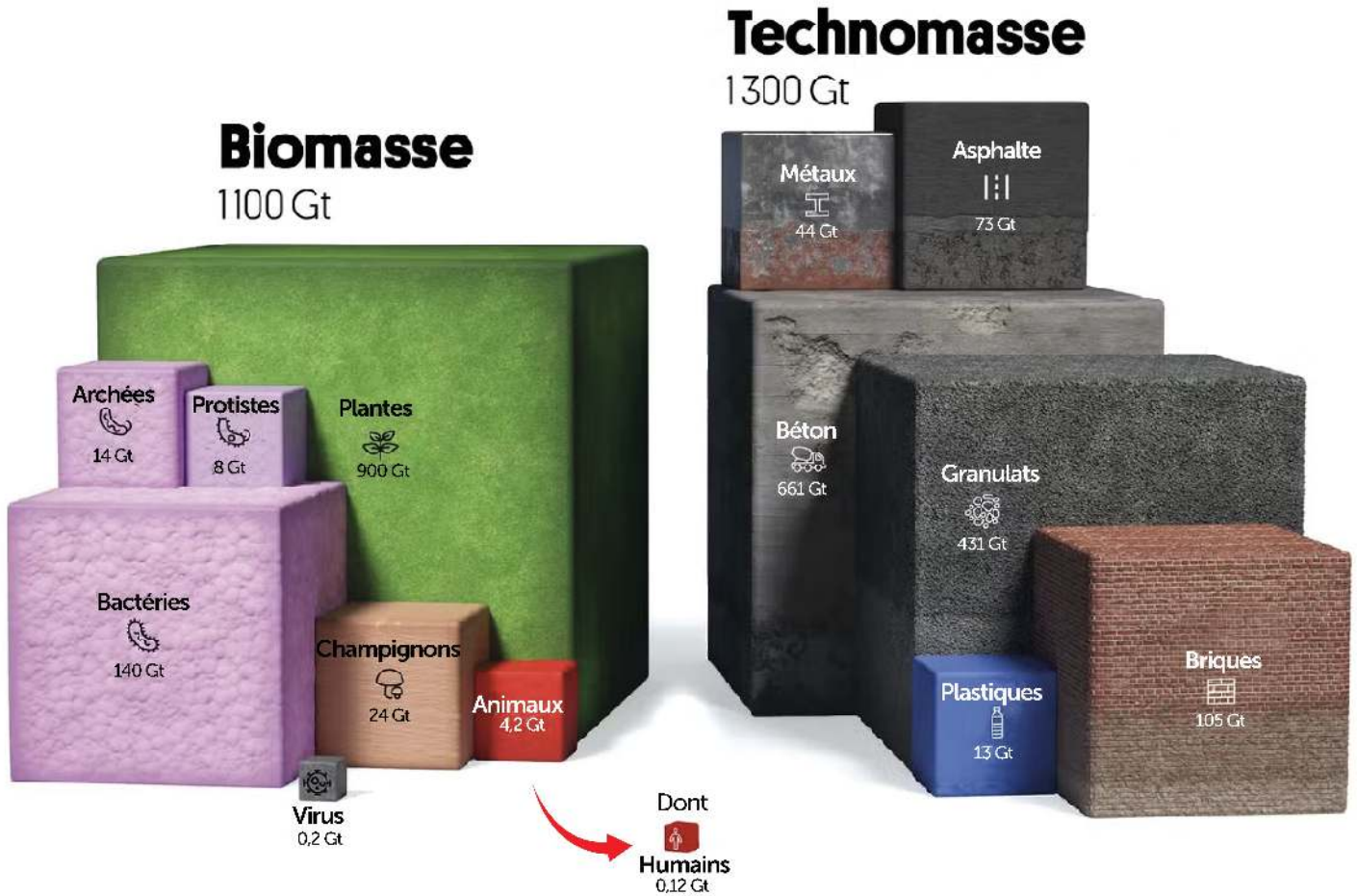
La quasi-totalité des objets du quotidien repose sur l'extraction de ressources minérales. Même un objet aussi anodin qu'un chewing-gum contient une charge minérale pour lui donner sa consistance. Si cet usage reste anecdotique, l'ampleur de l'extractivisme minier dans le monde l'est beaucoup moins.

Les ressources minérales sont depuis longtemps le fondement de nombreuses sociétés humaines au travers le monde. À tel point que plusieurs périodes de la préhistoire ou protohistoire prennent des noms faisant référence à ces ressources, comme l'âge de pierre, du fer ou du bronze. Depuis les débuts de l'humanité, ces ressources ont été utilisées comme outils, comme matériaux de construction ou pour en

faire des objets ornementaux. Les activités minières et les échanges sur de longues distances, plusieurs centaines voire milliers de kilomètres, sont documentés depuis des dizaines de milliers d'années. Ces matières minérales se sont accumulées dans les ouvrages humains pendant les siècles, mais c'est principalement à partir du milieu du XX<sup>e</sup> et du début du XXI<sup>e</sup> siècle que cette accumulation s'est envolée avec des tendances exponentielles .

On estime que l'ensemble des matières extraites par l'humanité dépasse aujourd'hui la masse totale de la biosphère terrestre.





Volume de matières d'origine humaine comparé au volume global de la biomasse. Gt : Gigatonne

# Des minéraux, pour quoi faire ?

Les **ressources minérales** font partie des ressources naturelles, c'est-à-dire de l'ensemble de substances, de milieux ou d'organismes utilisés pour satisfaire les besoins des êtres vivants.

Dans le cas de l'humain, la notion de besoin dépasse les conditions élémentaires de survie. Les ressources naturelles sont associées à une valeur économique, un capital exploité pour accumuler des richesses. L'association de ces deux notions : besoins et richesses pose question et nécessite une réflexion de fond sur l'usage que nous faisons de ces ressources.

Parmi les ressources naturelles, on distingue celles qui sont considérées comme renouvelables et celles qui ne le sont pas. Cette distinction se base sur le taux de renouvellement de la ressource comparé à sa consommation. Si le taux de renouvellement est inférieur à la quantité prélevée, la ressource n'est pas renouvelable. C'est le cas des ressources minérales dont le renouvellement se compte en millions d'années.



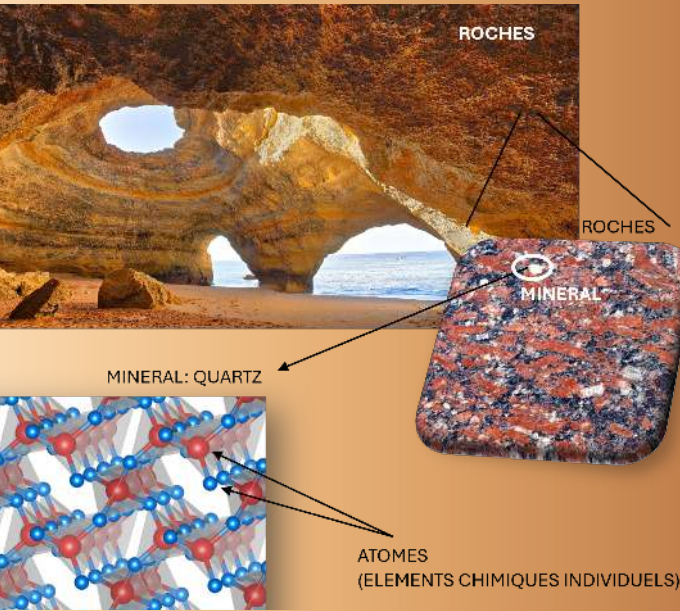


Illustration des différences d'échelles entre :  
 la roche = assemblage de minéraux à l'échelle macroscopique ;  
 le minéral = assemblage ordonné d'atomes (d'éléments chimiques individuels) à l'échelle microscopique.

Carrière de marbre de Carrare (Italie)



## Distinction des ressources minérales

Les ressources minérales ont pour point commun d'être issues des roches. Les **roches** sont des assemblages de **minéraux**. Le minéral étant un objet naturel, de composition chimique définie, pour lequel les **atomes** qui le composent suivent un arrangement régulier.

Les ressources minérales sont ensuite différenciées en trois grandes catégories :

### Les matériaux de construction

C'est le cas de roches, c'est-à-dire d'assemblages de minéraux, aux propriétés mécaniques et aux qualités visuelles particulières, tel que le marbre ou le granite utilisés comme revêtement ou parement, mais dont les usages restent modestes. C'est aussi le cas de minéraux comme le quartz. Ce minéral est le composant majoritaire du sable qui entre dans la constitution des bétons utilisés dans la majorité des infrastructures, que ce soit pour notre logement ou nos déplacements. En volume, ces sables et gravats sont d'ailleurs les principales matières premières minérales utilisées.



*Quartz : minéral industriel (en haut)  
Fluorite : minéral utilisé pour l'extraction du fluor (F) (en bas)  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*



### Le minéral industriel

Lorsque le minéral est utilisé pour ses propriétés intrinsèques (mécaniques, thermiques, chimiques, ...), on parle de minéral industriel. C'est à nouveau le cas du **quartz**, lorsqu'il est particulièrement pur. Ses propriétés vibrationnelles sont en effet très intéressantes pour mesurer précisément le temps.

Le quartz est **piézoélectrique**, cela signifie que lorsqu'il est soumis à une contrainte mécanique, il génère des charges électriques de surface. Inversement, s'il est traversé par un courant électrique, il produit une

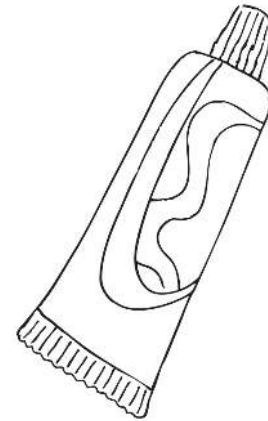
vibration mécanique. La fréquence à laquelle cette vibration a lieu est très peu sensible aux conditions extérieures, notamment la température. Ainsi, les résonateurs en quartz ont des propriétés chronométriques excellentes et peuvent servir à nos montres ou nos réveils.

### Les éléments chimiques

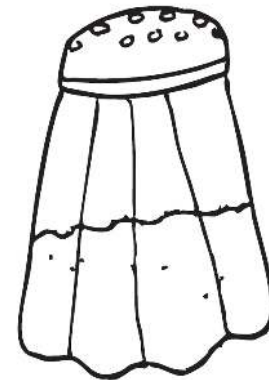
Enfin, on distingue les éléments chimiques individuels, c'est-à-dire les éléments purifiés et isolés issu du minéral. Dans le langage courant et le milieu industriel on se réfère à cette catégorie sous le terme de « métaux » au lieu d'éléments chimiques, ce qui est imprécis car les éléments purifiés ne sont pas tous des métaux.

Le **fluor** (F), par exemple, est un élément appartenant à la famille des halogénures est obtenu à partir de la **fluorite** (fluorine en français) de composition chimique :  $\text{CaF}_2$ . En chauffant la fluorite en présence d'acide sulfurique, on obtient de l'acide fluorhydrique (HF) dont on extrait le fluor.

Une des multiples utilisations du fluor est celle destinée à renforcer l'émail dentaire. De ce fait, le fluor est introduit dans le dentifrice en utilisant un sel - le fluorure de sodium (NaF) - obtenu au préalable par le mélange de l'acide fluorhydrique et de l'hydroxyde de sodium (NaOH), la soude. L'émail dentaire est constitué d'**apatite**, un **biominéral** synthétisé par notre organisme. La composition de l'apatite peut varier légèrement de l'hydroxyapatite ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ) à la fluorapatite ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ). La fluorapatite résiste mieux aux attaques bactériennes et aide donc à prévenir la formation des caries.



Un autre exemple est le sodium (Na) présent dans la **halite** (NaCl), plus communément appelée « sel de table ». Ce sel est très soluble et se dissout dans l'eau pour donner des ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) et des ions chlore ( $\text{Cl}^-$ ). C'est d'ailleurs le procédé inverse qui est utilisé dans les marais salants, l'eau de mer riche en ions sodium et chlore est évaporée pour permettre la précipitation du sel. Le sodium est un élément très important pour le vivant car il est indispensable au maintien de l'équilibre hydrique (contenu en eau) entre l'intérieur et l'extérieur des cellules. L'apport de quantités raisonnables de sodium, par exemple via l'ajout de halite dans l'alimentation, participe au bon fonctionnement de l'organisme.



Rares sont les minéraux composés d'un seul élément chimique, ces minéraux sont réunis dans la famille minéralogique des éléments dits « natifs », parmi eux on retrouve une grande quantité de métaux tels que le fer (Fe), l'or (Au), l'argent (Ag) mais aussi des non-métaux tels que le diamant, composé exclusivement de carbone (C) ou le soufre (S). Ces minéraux natifs sont peu abondants et les éléments chimiques qui les composent sont donc extraits d'autres minéraux bien plus nombreux.



Tableau périodique des éléments.  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université

## Diversification des usages des « métaux »

Au-delà de leurs propriétés essentielles d'un point de vue biologique, certains éléments chimiques ont été exploités par les sociétés humaines pour leurs caractéristiques physico-chimiques permettant la réalisation d'outils de plus en plus sophistiqués.

C'est le cas du **fer** dont la métallurgie se développe en Europe autour de 1000 ans avant notre ère grâce à l'invention des bas fourneaux, des fours capables d'obtenir le métal par réduction directe sans besoin de passer par la fusion du minerai. Plus récemment, les problèmes de corrosion des aciers (alliages de fer et de carbone) ont amené à exploiter les propriétés antioxydantes du **chrome** obtenu, par exemple, à partir de **chromite**. L'ajout de chrome dans les aciers permet de former une couche protectrice d'oxyde de chrome sur la surface qui empêche son altération. En d'autres termes, il empêche la transformation du fer présent dans l'acier en oxydes de fer : la « rouille ».

Les aciers inoxydables (« inox ») sont ainsi employés dans de nombreux domaines pour lesquels la corrosion s'avère problématique (construction, transports et, de façon plus anecdotique, ustensiles de cuisine).

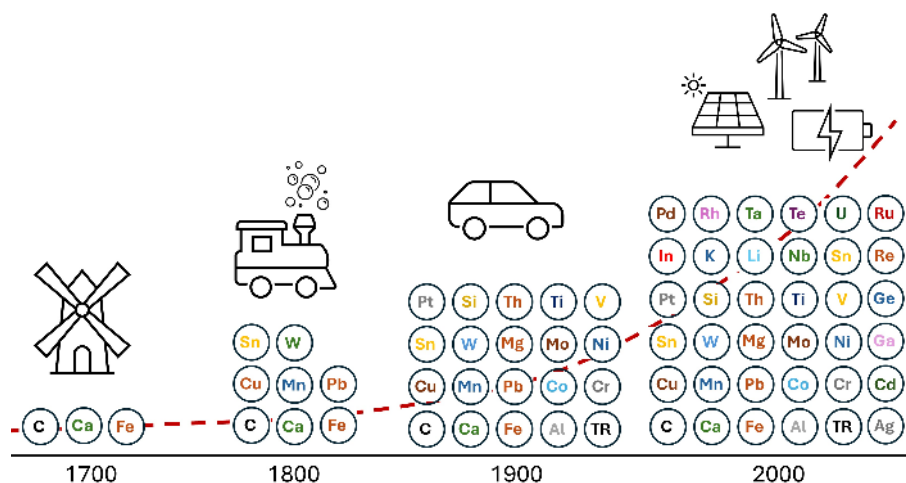
Ces types d'usages spécifiques se sont développés pour de nombreux autres éléments. On peut citer à nouveau le **fluor** issu de la fluorite qui est employé pour former des composés organiques aux propriétés antiadhésives exceptionnelles : les PFAS (substances per- et



polyfluoroalkylées). Ces composés sont aussi tristement célèbres pour leur nocivité pour la santé et les écosystèmes en raison de leur très faible dégradabilité (ce qui leur vaut le surnom de « polluants éternels »).

Leur usage dans les revêtements antiadhésifs s'est généralisé, comme dans les poêles, avant que des tentatives de régulations ne voient le jour.

Une autre illustration est l'**aluminium**. Lorsqu'il est précipité sous forme de sels (ex. : chlorures d'aluminium  $\text{AlCl}_3$  ou sel d'alun, disulfate d'aluminium et potassium  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), il a la capacité de boucher les conduits sudoripares (qui produisent la sueur). Ces sels ont donc été massivement utilisés dans les anti-transpirants. Ici encore, nombreux sont les questionnements sur les conséquences pour la santé humaine.



La diversité des éléments chimiques présents dans les objets du quotidien est frappante. Des quelques éléments chimiques utilisés jusqu'à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, on emploie aujourd'hui la majorité des éléments du tableau périodique à l'échelle industrielle.

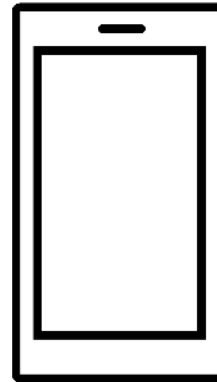
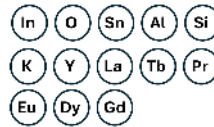
*Illustration schématique de la diversité des éléments utilisés au cours des siècles pour les technologies les plus répandues.*

Un exemple emblématique de cette diversification des usages est le smartphone. A lui seul il peut contenir plus de la moitié des éléments chimiques présents naturellement sur Terre, alors qu'il pèse au plus quelques centaines de grammes.

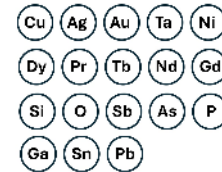
*Éléments chimiques utilisés pour les principaux composants d'un smartphone.*

*Tableau périodique des éléments indiquant leur abondance, leur disponibilité future, et leur utilisation.*

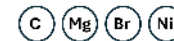
**Ecran**



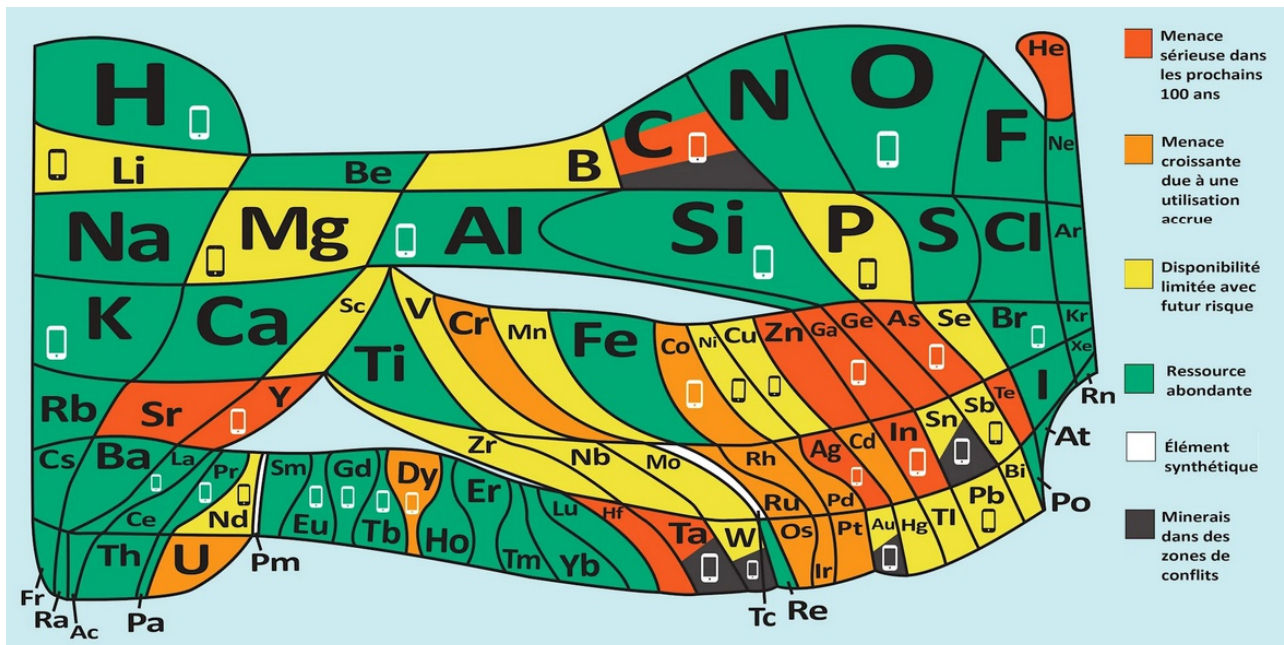
**Electronique**



**Coque**

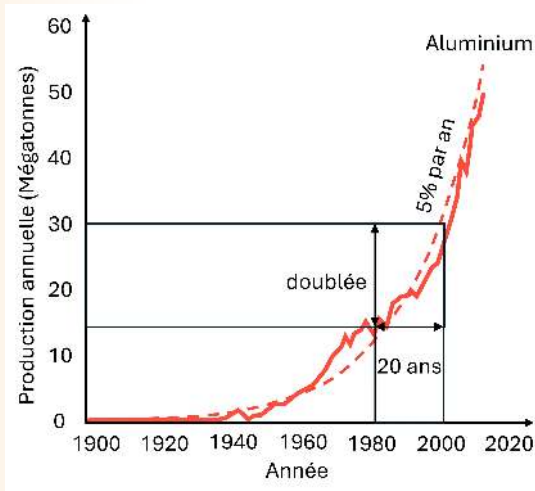


**Batterie**



# Croissance exponentielle de la consommation

Au-delà de la diversification des usages, le développement de la société de consommation dans les pays du Nord global a abouti à une explosion de la consommation des matières premières minérales. Que ce soient les matériaux de construction ou les « métaux », on constate des croissances exponentielles, de l'ordre de quelques pourcents par an. Un taux de croissance de 5 % par an (courbe rouge dans la figure ci-dessous pour l'aluminium) signifie que la quantité de matériau extrait chaque année double tous les 20 ans.



*Evolution historique de la production en trait plein et tendances de croissance exponentielle les plus proches pour l'aluminium.*

Ce type de croissance est difficile à appréhender, car elle n'est pas linéaire. Or notre cerveau est plus familier avec le concept d'évolution linéaire. Si l'on double en 20 ans, cela signifie qu'en 200 ans, on multiplie par mille la quantité de ressource consommée annuellement. Ce type de trajectoire n'est donc évidemment pas soutenable à long terme dans un monde fini.

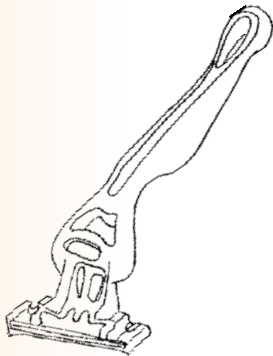
Le **cuivre** illustre bien ces tendances d'évolution de la consommation et le problème posé par l'augmentation continue de la demande. Du fait de sa conductivité électrique unique et de sa

relative abondance, il est l'élément le plus adapté pour la confection de câbles électriques et de circuits électroniques. Le passage à l'électrique comme énergie préférentielle dans nombreux secteurs, pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, doit forcément s'accompagner d'une croissance de la demande en cuivre. Évidemment, les prévisions de ces évolutions reposent sur des scénarios sociétaux dépendant eux-mêmes d'un grand nombre de facteurs.

Selon l'exigence des objectifs de limitation du réchauffement climatique (par exemple les accords de Paris visent une augmentation maximale entre de 1,5 °C et 2 °C), les scénarios peuvent intégrer des contraintes plus ou moins fortes sur l'évolution des émissions de gaz à effet de serre et donc suggérer un mix énergétique plus ou moins orienté vers l'électrique. De plus, tous les scénarios se doivent d'intégrer une évolution de la demande en énergie selon les orientations socio-économiques choisies, en particulier selon le niveau de sobriété fixé. Pour des scénarios suivant les trajectoires de réduction fixés par les accords de Paris sans diminution sensible de la demande en énergie, le besoin en cuivre est amené à doubler à l'horizon 2040 par rapport aux années 2020. Une évolution similaire est anticipée pour de nombreux métaux (lithium, nickel, cobalt, terres rares...). La demande en ressources minérales n'est donc pas appelée à décroître dans les décennies à venir, ce qui pose la question de la **soutenabilité** de tels scénarios à tous les niveaux :

- Géologique : disponibilité de la ressource
- Géopolitique: partage des ressources
- Économique: évolution des prix
- Environnemental : impacts écologiques et sanitaires
- Social : conditions de travail et sanitaires liées à l'extraction

# Processus géologiques et concentration des éléments à des niveaux exploitables



Pour saisir les enjeux évoqués, il est nécessaire de comprendre comment se concentrent les éléments dans la croûte terrestre et sous quelle forme.

Le **fer**, par exemple, est un élément présent en abondance autour de nous. Dans les objets du quotidien, on le retrouve dans les aciers ou il est mélangé à une faible quantité de carbone (< 2 %), ce qui lui confère des propriétés mécaniques de dureté, de résistance et d'élasticité très intéressantes (pensons par exemple à la lame d'un rasoir). C'est aussi un élément relativement abondant dans les roches qui nous

entourent. Avec une teneur moyenne de 5 % en masse dans la croûte terrestre, c'est le 4<sup>e</sup> élément le plus abondant après l'oxygène, le silicium et l'aluminium. Pourtant, il n'est pas exploité à partir de n'importe quelle roche.

Comme pour les autres éléments chimiques, afin que la roche puisse être techniquement et économiquement exploitable, il est nécessaire que des processus géochimiques, parfois couplés à une activité biologique, soient à l'origine d'une concentration suffisamment élevée. Dans le cas du fer, ces processus reposent sur sa capacité à s'oxyder. Selon la quantité des molécules d'oxygène (O<sub>2</sub>) dans l'environnement, le

fer est présent sous forme d'ions ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) en conditions réductrices (pauvres en oxygène), ou d'ions ferriques ( $\text{Fe}^{3+}$ ) en conditions oxydantes (riches en oxygène). Ces deux éléments n'ont pas la même solubilité : les ions ferreux sont solubles et restent en solution dans l'eau, tandis que les ions ferriques, insolubles, vont précipiter pour former des oxydes de fer comme l'**hématite** ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).



*Hématite : minéral utilisé pour l'extraction du fer.  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*

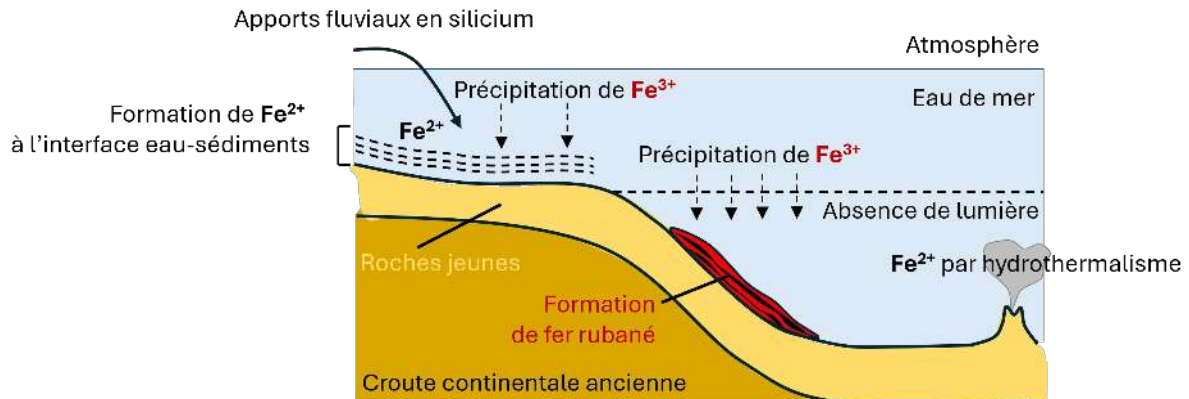
Il y a environ 2,5 milliards d'années, l'atmosphère et les eaux océaniques étaient pauvres en oxygène. Le fer issu de l'activité volcanique était dissous sous forme d'ions ferreux solubles dans les océans. Autour de cette période, la production de molécule d'oxygène par la photosynthèse due à l'activité biologique de cyanobactéries a engendré une oxydation graduelle des eaux océaniques, au moins à l'échelle locale. Le fer ferreux s'est donc progressivement oxydé dans ces zones pour donner du fer ferrique, insoluble. Le fer a alors précipité et s'est déposé sous forme de couches d'oxydes de fer, notamment de **magnétite** ( $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ ) et d'hématite, arborant une teinte rouge à brun foncé.

Ces formations sont connues sous le nom de « fer rubané ». Les épisodes de formation de tels gisements se sont arrêtés lorsque

l'oxygénation totale des océans a épuisé la quantité de fer ferreux dissout. Ces processus de concentration du fer peuvent être encore renforcés par l'altération en surface, grâce par exemple au lessivage des éléments les plus solubles du fait des pluies et des circulations d'eau au sein de la roche.

On voit ici-dessous comment le couplage des activités géologiques (volcanisme, érosion), biologique (photosynthèse) et des propriétés chimiques des éléments (solubilité) amène à la concentration d'un élément chimique.

Les gisements de fer rubané contiennent communément 30 % de fer en masse, voir plus lorsqu'ils subissent une altération supplémentaire en surface sous l'action des eaux de pluie. Cela permet d'atteindre des concentrations techniquement et économiquement viables et fait de ces



*Processus géologiques et biochimiques de formation des gisements de fer rubané.*

gisements la principale source de minerai de fer. On voit donc que c'est une ressource non renouvelable, au vu des processus uniques et anciens qui ont amené à sa formation. De plus, la localisation des gisements de fer dépend de la présence de roches anciennes, d'âge supérieur à 2 milliards d'années. La distribution des roches anciennes à la surface de la Terre va donc déterminer la répartition géographique des gisements.

Cette répartition, couplée à des déterminants politiques, économiques et sociaux, contraint la distribution de la production minière à l'échelle mondiale et est à l'origine de problèmes d'approvisionnement, de conflits géopolitiques ou de politiques impérialistes pour la possession des ressources.



*Exemple de fer rubané.  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*

# Processus géologiques de concentration imparfaits : extraction et traitement du minerai

---

L'inégale répartition des gisements s'est illustrée dans l'actualité lors de la « crise des terres rares ». Cette famille d'éléments chimiques est utilisée dans diverses technologies, souvent associées au numérique ou à la production d'énergie. C'est le cas, par exemple, des écrans de smartphones, qui bénéficient des propriétés luminophores de ces éléments chimiques, ou encore des aimants permanents, utilisés pour convertir l'énergie mécanique en électricité dans les éoliennes.

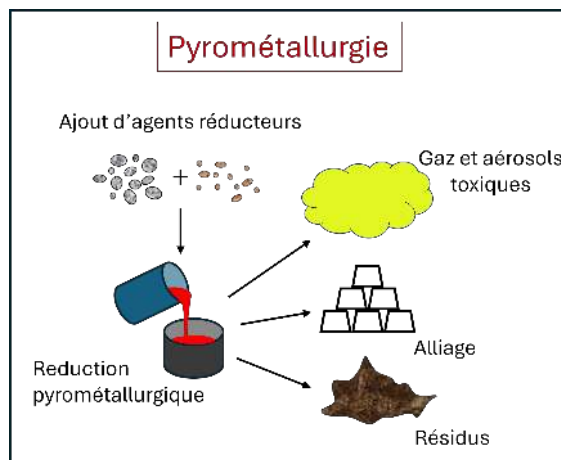
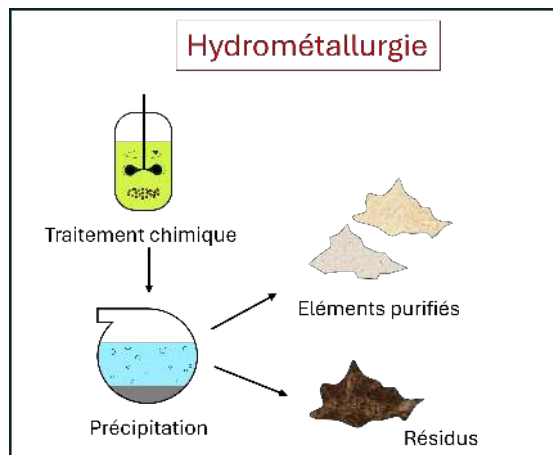
En 2010, les tensions entre la Chine et le Japon au sujet de la propriété d'un chapelet d'îles dans le Pacifique ont amené les autorités chinoises à imposer des restrictions sur l'exportation de terres rares. Étant le principal pays producteur de ces éléments, au-delà de 99 % pour certaines terres rares. Les prix se sont envolés, ce qui a relancé l'exploitation de mines anciennes délaissées ainsi que l'ouverture de nouveaux gisements.

Malgré cet apparent manque de ressources et ce que leur nom pourrait laisser penser, l'abondance des terres rares dans la croûte terrestre n'est pas si faible. Certaines sont plus abondantes que le plomb ou le cuivre. Néanmoins, les processus géologiques susceptibles de concentrer ces éléments dans des proportions suffisantes sont rares, ce qui fait que les gisements sont peu nombreux. En plus de leur rareté, ces processus sont largement imparfaits. Les concentrations de terres rares dans les gisements exploités sont autour de 0,1 %. Il faut donc une succession de procédés afin de les raffiner et de les rendre utilisables par l'industrie.

Contrairement à l'image d'Épinal de la mine souterraine, les deux tiers des exploitations minières sont à ciel ouvert. La roche doit être dynamitée, puis le minerai concassé avant d'être transporté vers un site de valorisation. À ce stade, elle est broyée pour séparer les différents minéraux les uns des autres. Une première étape, dite de « **minéralurgie** », peut alors commencer afin de concentrer le ou les minéraux porteurs des éléments chimiques d'intérêt.

Pour cela, on exploite les propriétés physiques ou chimiques distinctes des minéraux. Ils peuvent être triés en fonction de leur densité, de leur magnétisme ou encore de leurs propriétés de surface. L'ajout de réactifs chimiques rend certaines surfaces minérales hydrophobes et permet la formation d'une mousse contenant les phases minérales à trier qui deviennent, de ce fait, faciles à récupérer. C'est le procédé de flottation. On obtient alors un concentré, qui contient en général quelques dizaines de pourcents de l'élément recherché. Par la suite ce

concentré sera purifié grâce à une seconde étape dite de « **métallurgie** ».

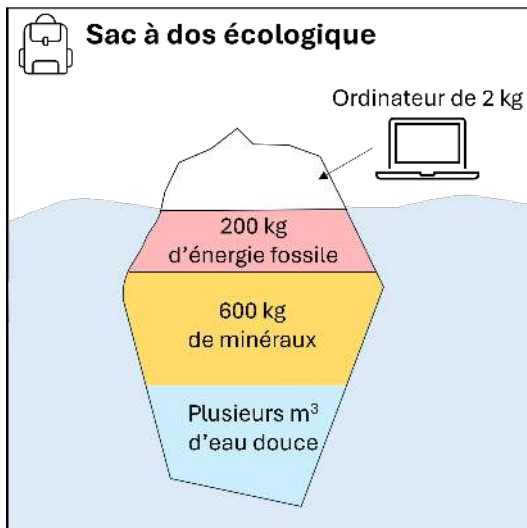


*Schéma de principe des deux grands procédés métallurgiques de transformation du minerai en métal.*

Sans entrer dans les détails, spécifiques à chaque élément et chaque minéral, il existe deux grandes voies. Dans la voie pyrométallurgique, un traitement thermique est appliqué au minéral qui va ensuite réagir pour former un composé qui peut être séparé. Pour la voie hydrométallurgique, ce sont des solvants et des acides qui vont permettre de dissoudre le minéral et de séparer l'élément exploité. Une étape finale de purification va permettre d'obtenir un composé dont la pureté ainsi que la forme (métal, oxyde, carbonate...) sont compatibles avec les besoins de l'utilisateur final.

La confection de n'importe quel objet mobilise donc un volume de ressources très large. La masse mobilisée est parfois plusieurs milliers de fois plus importante que la masse intrinsèque de l'objet, comme pour les outils numériques. C'est le concept de **sac à dos écologique** incluant l'ensemble des ressources nécessaires pour la confection de l'objet. Par exemple, pour un smartphone, les terres rares représentent environ 0,5 g

pour lesquels cent fois plus de roches (50 g), ont dû être extraites pour le produire. Il faut ajouter à cela les combustibles fossiles qui auront été nécessaires pour fournir l'énergie dans les différentes phases d'extraction et de purification, l'eau nécessaire aux différents processus de raffinage ainsi que les différents composés chimiques, nécessaires par exemple pour la flottation ou encore les étapes hydrométallurgiques.



*Schéma du « sac à dos écologique » associé à la confection d'un ordinateur portable.*

## Conséquences environnementales des faibles concentrations et des procédés miniers

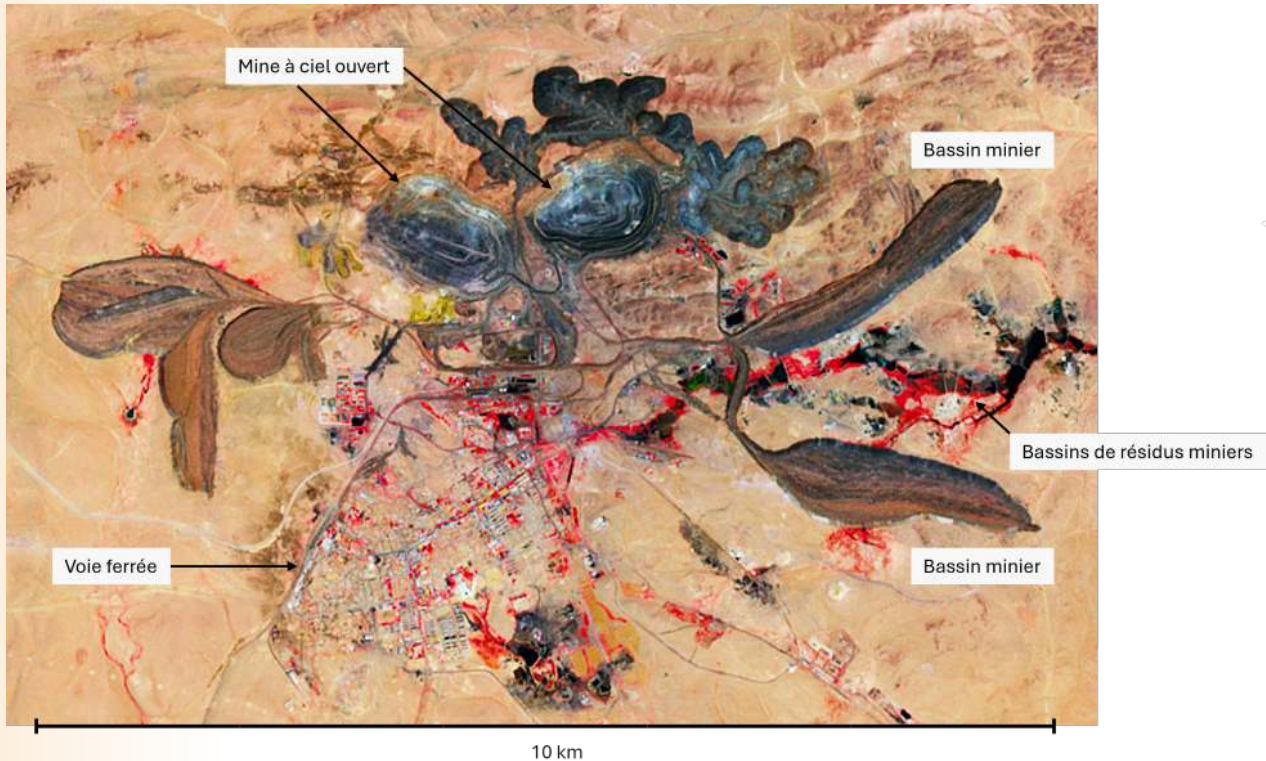
---

Ces procédés ne sont évidemment pas neutres pour l'environnement. Certains des éléments extraits sont toxiques, même à très faible dose, comme l'arsenic. Du fait des propriétés électroniques du composé qu'il forme avec le gallium, il peut émettre de la lumière et est ainsi utilisé pour les éclairages LED. Pourtant, cet élément est un cancérogène avéré. Au-delà des impacts sanitaires des éléments extraits, l'ensemble des processus d'extractions génère des impacts non négligeables sur l'environnement.

L'implantation d'une mine nécessite la destruction des écosystèmes dans l'espace occupé par la mine, ainsi qu'aux alentours avec les installations de traitement du minerai et celles nécessaires à son transport. Des volumes considérables de roches sont extraits et traités, ce qui implique une consommation massive d'énergie, essentiellement d'origine fossile et donc émettrice de gaz à effet de serre. Cette énergie est utilisée pour le concassage et le broyage, ainsi que pour le transport des matériaux ou encore pour les traitements thermiques associés à la pyrométallurgie.

L'extraction à l'explosif, le concassage et le transport génèrent des poussières importantes, plus ou moins problématiques pour les écosystèmes et la santé, qui engendrent localement une pollution de l'air aux aérosols.

Les composés chimiques utilisés pour le traitement des minerais peuvent avoir diverses conséquences s'ils sont libérés dans l'environnement (acidification, pollution des eaux...) et leur dispersion doit être évitée.



*Image en fausses couleurs illustrant l'emprise au sol de la mine de Bayan Obo en Chine.*

Une fois traités, les minerais génèrent des volumes considérables de stériles (roches insuffisamment concentrées pour être exploitées) ainsi que de résidus (déchets issus du traitement du minerai) qui doivent être stockés. Ce stockage pose la question des espaces disponibles. Tant que dure l'exploitation de la mine, elle ne peut pas être comblé par ces déchets. Cet espace est de toute façon insuffisant en raison du « foisonnement minier » : le volume occupé par la roche augmente de 30 à 40% une fois qu'elle est extraite et broyée.

Par ailleurs, ces déchets ne sont pas inertes. Comme évoqué précédemment, les processus de traitement impliquent l'utilisation de réactifs posant divers problèmes environnementaux. Le minerai en lui-même est susceptible de libérer des **composés toxiques**. Par exemple, l'arsenic est extrait à partir de sulfures, tels que l'arsénopyrite ( $\text{FeAsS}$ ). Le minerai contient de nombreuses phases sulfurées (avec du soufre, S, réduit) instables.

Lorsque les résidus sont exposés aux précipitations et à l'air, ils s'oxydent et libèrent le soufre qu'ils contiennent sous forme d'acide sulfurique. C'est ce qu'on appelle les « drainages miniers acides ». Ils libèrent aussi le cortège de métaux associés au soufre dans les sulfures avec des niveaux de toxicités parfois très élevés.

Afin de limiter ce phénomène, les déchets peuvent être stockés à l'abri de l'air dans des parcs à résidus. En général, les déchets sont ennoyés et l'écoulement est limité par des digues ou des barrages. Ces ouvrages ne sont néanmoins pas éternels et cèdent plus ou moins



*Rupture de la digue à résidus de Mount Polley au Canada.*



*Coloration du Río Tinto en Espagne dans une région où l'exploitation des métaux a débuté dès l'antiquité.*

précocement, chargeant l'eau en particules en suspension, modifiant les paramètres chimiques du milieu (pH, turbidité...) et libérant les polluants qu'ils contiennent.

Les procédés miniers nécessitent l'**utilisation d'eau** à différentes phases de l'extraction ou du traitement. Les nappes doivent parfois être pompées pour dénoyer la roche qui doit être exploitée. Des volumes d'eau conséquents doivent être prélevés pour le traitement du minerai. Certains procédés ajoutent une pression supplémentaire sur la ressource en eau dans des environnements déjà arides.

C'est le cas des saumures riches en **lithium** du désert de l'Atacama. Pompées en profondeur, elles sont stockées en surface jusqu'à évaporation et précipitation des sels.

Finalement, à l'issue de l'exploitation de la mine, les environnements aquatiques proches sont en général pollués et les **sols stérilisés** et **contaminés** sur des surfaces qui dépassent largement l'emprise du site minier. Par exemple, l'ancienne mine d'or de Salsigne dans l'Aude est un des sites les plus pollués aux métaux (en particulier à l'**arsenic**) de France. La gestion de l'après-mine en France reste un enjeu environnemental fort. Beaucoup de sites, dont l'activité est terminée depuis plusieurs décennies, restent contaminés et le seront potentiellement sur des échelles de temps centennales voire des millénaires.

## Conséquences socio-économiques

---

Au-delà des problématiques sanitaire et environnementale posées par l'extraction, les ressources minières sont aussi à l'origine de conséquences socio-économiques souvent dramatiques. Ce phénomène a parfois été nommé « malédiction des ressources naturelles » ou « malédiction des matières premières » pour désigner les retombées négatives associées à leur exploitation, en particulier dans les pays du Sud global.

L'exemple emblématique de ce phénomène est l'extraction des diamants en République Démocratique du Congo. Ces minéraux sont utilisés comme abrasifs ou encore, de façon plus anecdotique, dans les platines vinyle pour suivre les sillons des disques et convertir les vibrations associées en signal audio. Le reste des utilisations étant pour les diamants de qualité gemme en joaillerie. Du fait de leur forte valeur ajoutée, en particulier pour la bijouterie, leur extraction dans les zones de conflit a amené à financer les armes et munitions aux factions qui contrôlent ces territoires. Ils ont ainsi parfois été appelés « diamants de conflits » ou « diamants de sang ». Au-delà de ces cas dramatiques, de nombreux bouleversements socio-économiques associés à l'industrie minière sont bien documentés.

Si les retombées économiques potentielles pour les territoires concernés par l'ouverture et l'exploitation de mines expliquent facilement l'intérêt pour l'extraction, la réalité de la répartition des bénéfices est souvent contrastée. La concentration des exploitations dans les états fragiles



*Mine artisanale de coltan (colombo-tantalite, minéral de niobium et de tantale) dans le Kivu en République démocratique du Congo surveillée par des milices armées.*

politiquement et économiquement, ou dans des zones peu densément peuplées de pays très vastes, s'explique par les plus faibles oppositions rencontrées dans ces contextes, ainsi que par les contraintes environnementales et sociales souvent moindres. L'industrie minière est ainsi dénoncée depuis des décennies, par des instances officielles, comme l'ONU, pour les violations des droits humains dont elle est à l'origine.

Ces violations concernent notamment le non-respect des droits des travailleurs et travailleuses, avec des nombreux accidents du travail et l'exposition quotidienne à des substances dangereuses. La contamination des milieux de vie met aussi en danger les populations locales. Les mines, localisées dans des régions souvent occupées uniquement par des peuples autochtones, menacent leurs cultures, souvent intimement liées à leur environnement et à leur terre, et jusqu'à leur vie dans les zones qui représentent leur seul refuge. L'extraction minière contribue par ailleurs à accentuer les discriminations existantes à l'égard des femmes en les excluant des emplois ; elles sont alors reléguées aux activités agricoles et de subsistance.

La mise en place d'activités minières engendre aussi des déplacements de population ainsi que des migrations. Les premiers, volontaires ou

contraints, sont associés à l'appropriation des terres par l'industrie minière, à la mise en place d'infrastructures perturbant la vie locale et à la destruction ou à la contamination des milieux existants.

La mise en place d'une mine est aussi fréquemment associée à la migration de travailleuses et travailleurs qualifiés pour assurer l'extraction du métal recherché, ainsi qu'à des métiers dans tous les secteurs associés au fonctionnement du site et à ceux associés à la vie de ces nouvelles populations. Évidemment, ces changements peuvent être bénéfiques pour l'activité et l'économie locale. Ils s'accompagnent pourtant aussi d'une augmentation des prix du foncier et de conflits entre populations locales et migrantes. Cette combinaison de migrations et de déplacements peut engendrer une déstabilisation du tissu socio-économique, en détériorant la cohésion sociale et en apportant des changements culturels qui peuvent amener à la marginalisation de certains groupes, voire à l'apparition de violences ou d'affrontements. Cette déstabilisation est renforcée par l'augmentation du coût de la vie, l'accroissement des problèmes sociaux (consommation d'alcool, de drogue, prostitution) et les discriminations de genre ou sur les minorités, parfois autochtones.

Parmi les conflits environnementaux répertoriés, environ un cinquième est associé à l'extraction des ressources minérales. Ces conflits sont liés à la répartition des bénéfices, aux dégradations environnementales et aux violations des droits des peuples autochtones ainsi qu'au manque de concertation et de participation des populations locales dans les projets miniers. Les forces de sécurité, voire les forces de police ou l'armée, lorsque les industriels sont soutenus par l'État, peuvent mener une

répression forte accompagnée de violences envers l'opposition aux projets d'exploitation minière, pouvant aller jusqu'à des assassinats. Comme nous l'avons vu, les perspectives de croissance de la demande en métaux laissent à penser que les pressions pour l'extraction des ressources minérales sont amenées à croître. Sans évolution dans la conception des projets et des modes opératoires des entreprises minières et des modes d'attribution des permis d'exploitation par les États, il est probable que l'on assiste à un accroissement des conflits associés. Ainsi, en 2017, le Salvador avait été le premier pays au monde à interdire toute nouvelle exploitation minière pour faire face aux effets néfastes de ces opérations sur l'environnement et au peu de bénéfices retirés par les communautés locales. Si, depuis fin 2024, à la faveur d'un changement de présidence, cette interdiction a été levée, elle a montré jusqu'où pouvait monter le niveau d'opposition à l'extraction minière.



*Atlas global de la justice environnementale répertoriant les conflits environnementaux associés à l'extraction des ressources minérales.*

# Approvisionnement en ressources minérales : finitude des ressources et nouveaux horizons

---

En plus de la question des impacts de l'extraction minière, une question récurrente lorsque l'on évoque les ressources minérales est celle de la capacité d'approvisionnement.

Par exemple, le **nickel**, un élément essentiellement utilisé dans les aciers inoxydables, mais aussi de façon grandissante dans certaines technologies de batteries, fait partie des métaux dont les prix sont les plus volatils, ce qui lui a valu le surnom de « métal du diable ». Cette volatilité est liée aux craintes de rupture d'approvisionnement, avec des prévisions de demande croissante qui, couplées aux incertitudes politiques existantes au sein des principaux pays producteurs, engendrent une augmentation des prix.

À l'inverse, l'abondance de la production éventuellement couplée à la diminution des échanges commerciaux liés au contexte économique ou géopolitique (crise du Covid, augmentation des droits de douane...) engendrent des baisses conséquentes. Ces prix bas n'encouragent pas les investissements dans les infrastructures minières et de recyclage susceptibles de subvenir aux besoins et alimentent de nouvelles incertitudes sur l'approvisionnement. Au-delà de la spéculation associée aux événements géopolitiques ou aux évolutions économiques et sociétales, la connaissance géologique des ressources permet de donner des repères relativement solides en termes de ressources disponibles.

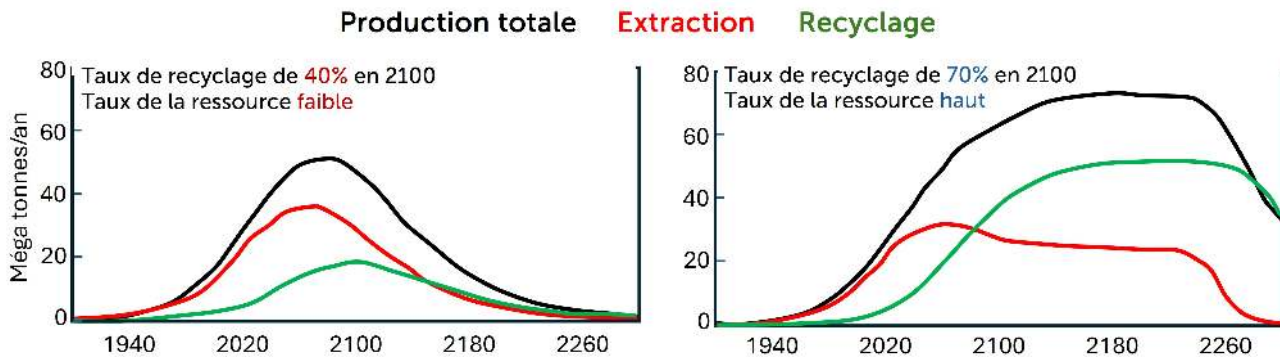
L'estimation de la **ressource** se base sur un travail géologique d'évaluation de l'ensemble des volumes de roches susceptibles d'être exploités un jour dans un horizon d'évolutions économiques et techniques réalistes. Elle se distingue de la **réserve**, qui constitue la partie de la ressource exploitable dans les conditions techniques et économiques présentes. Afin d'évaluer l'évolution des capacités d'approvisionnement, les approches utilisées peuvent être distinctes, mais reposent sur quelques principes de base.



*Cuivre natif, Coro Coro, Bolivie.  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*

Les estimations géologiques de la ressource servent de base et peuvent être converties en réserve en estimant la teneur de coupure, à savoir la concentration en dessous de laquelle la roche n'est plus exploitable dans des conditions économiques données. Ainsi, des estimations de l'évolution des prix et du coût de l'extraction permettent d'évaluer l'évolution de la réserve au cours du temps. À cela doit s'ajouter la capacité de recyclage envisagée. Il faut ensuite évaluer l'évolution de la demande en fonction de scénarios d'évolutions technologiques et sociétales.

L'utilisation de ce type de modèle indique que des pics de production pour les métaux les mieux étudiés, tels que le **cuivre**, pourraient être atteints dans la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle. Évidemment, de larges incertitudes entourent ces estimations, qui dépendent des paramètres



*Modèles évaluant l'évolution de la production de cuivre sur le long terme en fonction des estimations de la ressource (CuOG) et du taux de recyclage (CRRR).*

intégrés aux modèles ainsi que des hypothèses sur les évolutions économiques et sociétales à venir. Néanmoins, on peut envisager qu'à l'horizon de la fin du siècle, le risque majeur n'est pas celui d'une pénurie géologique de métaux. Les principaux problèmes résulteront des événements géopolitiques et des contraintes économiques, environnementales et sociales qui pourraient aboutir à des tensions fortes pour l'approvisionnement de certains métaux.

Pourtant, de nouveaux horizons extractifs sont déjà envisagés. Le premier évoqué est souvent l'espace. De vastes quantités de métaux sont présentes dans les astéroïdes. Un seul astéroïde peut parfois contenir plusieurs milliers, voire millions de fois la quantité de fer ou de nickel extraite annuellement sur Terre. De telles exploitations sont envisagées car elles permettraient de s'affranchir des contraintes environnementales et sociales. Cependant, elles ignorent souvent l'impact énergétique et les ressources nécessaires sur Terre pour le développement et le lancement

dans l'espace des infrastructures nécessaires à l'extraction spatiale. De plus, elles supposent des avancées technologiques qui sont loin d'être disponibles afin de s'adapter aux conditions d'extraction sur la Lune ou les astéroïdes (rayonnement cosmique, variations de température extrêmes, poussières lunaires abrasives, vide, faible gravité...). Les obstacles sont nombreux et des entreprises qui avaient levé des fonds autour de 2010 ont maintenant disparu. Quand bien même ces projets aboutiraient, l'extraction de métaux des astéroïdes ne pourrait se substituer à l'approvisionnement terrestre qu'à des échelles de temps lointaines, une fois que les contraintes techniques seront levées.

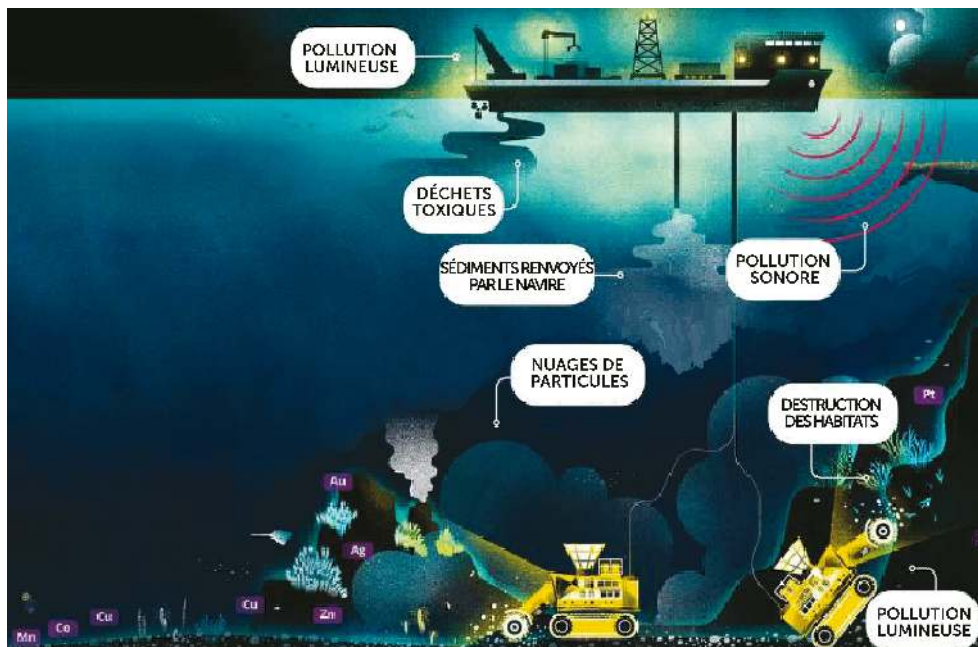
L'autre horizon extractif est celui des grands fonds marins. Si la rentabilité économique de telles exploitations reste une question ouverte, elle est techniquement et économiquement plus mature que pour l'espace. La technologie consisterait à envoyer des engins pour, selon le type de gisement, racler, casser ou découper les fonds marins. Les matériaux seraient remontés via des systèmes de pompage avec l'eau de mer, traités sur un navire avant d'être ramenés à terre.

Les impacts sur les écosystèmes marins encore peu connus sont nombreux. Les habitats et la faune associée seront détruits lors de la collecte du minerai, la mise en suspension de particules associées au processus de séparation et de collecte du minerai engendrera une augmentation de la turbidité et une modification de la composition chimique des eaux.

Des questions se posent aussi sur la diminution de l'efficacité du puits de dioxyde de carbone que constitue l'océan. Ce gaz à effet de serre dissous et piégé en profondeur pourrait être remonté du fait de la

dynamique créée par le pompage. La pompe biologique à dioxyde de carbone pourrait être amoindrie du fait de la perte de biodiversité marine dans les zones d'exploitations, voire au-delà, puisque l'incidence sur la chaîne trophique reste mal connue.

Finalement, au-delà des zones économiques exclusives, les fonds marins sont le patrimoine commun de l'humanité selon les résolutions de l'ONU. Une question juridique et éthique relative à la légalité et à la légitimité de telles exploitations à des fins d'enrichissement privé se pose donc au regard des conséquences environnementales.



## Le retour de la mine en France

La délocalisation de l'extraction minière pose les problèmes sociaux et environnementaux documentés précédemment. Elle pose aussi, et c'est souvent l'argument principal, la question de la sécurisation de l'approvisionnement dans un monde dans lequel les incertitudes géopolitiques sont grandissantes. Face à cela, la France ainsi que l'Union européenne déploient des politiques afin de relocaliser la mine sur leurs territoires.

L'exemple typique est celui du **lithium**. Les volumes de lithium consommés augmentent exponentiellement du fait de son utilisation pour la mobilité électrique. Les batteries au lithium sont en effet les seules technologies de batteries développées à l'échelle industrielle avec une densité de charge massive compatible avec une utilisation dans les

transports, pour lesquels une grande autonomie couplée à une faible densité des batteries s'impose.

Face à la forte demande, le « Critical Raw Material Act » a été mis en place. Cette politique vise à mettre en œuvre une stratégie de sécurisation de l'approvisionnement en matériaux dits « critiques », c'est-à-dire pour lesquels les risques de pénurie sont élevés au regard de leur importance économique. De



*source de Lithium (lépidolite).  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*

nombreux projets miniers d'extraction de lithium ont ainsi vu le jour en Europe. On peut citer notamment celui de la région de Jadar en Serbie, pour lequel les concentrations en lithium sont telles qu'un minéral lithinifère (porteur de lithium), la **jadarite**, a été découvert dans ce gisement.

Des projets d'extraction de lithium ont été retenus pour recevoir un support financier de l'Union Européenne en Allemagne, en Espagne, en Finlande, en Italie, au Portugal, en République Tchèque ainsi qu'en France. En France, des projets d'extraction de lithium des saumures hydrothermales couplés à de la géothermie se développent en Alsace. L'efficacité technique du procédé n'est pas encore démontrée à l'échelle industrielle. De plus, ces projets rencontrent une opposition citoyenne après des séismes concomitants à des opérations de forage. Un autre projet, dans la baie d'Audierne en Bretagne, a été évoqué, mais il se trouve au milieu d'une zone protégée pour son importance écologique, et notamment classée Natura 2000.

Le projet d'extraction le plus mature est celui situé à Échassières, dans l'Allier. Ce projet de mine de lithium, porté par la société Imerys, propose d'exploiter en souterrain le lithium contenu dans les micas



*Vue de la carrière de kaolin exploitée par Imerys sous laquelle pourrait être ouverte une mine de lithium.*

du granite minéralisé de Beauvoir afin de produire 34000 tonnes d'hydroxyde de lithium (LiOH) par an. Ce projet est présenté par Imerys comme vertueux d'un point de vue socio-économique et environnemental, du fait des standards élevés respectés par l'entreprise dans l'extraction. Il est aussi défendu car il participerait à la transition énergétique en contribuant à l'électrification des mobilités.

Il est pourtant contesté à l'échelle locale et nationale, comme l'a montré le débat public organisé par la Commission Nationale du Débat Public (CNDP). Les arguments s'y opposant sont nombreux. Bien que mieux disant environnementalement comparé à certaines activités minières du Sud global, la mine « verte », « propre » ou « responsable » souvent évoquée reste un concept sans réalité concrète.

Les activités minières génèrent les impacts environnementaux qui, s'ils peuvent être limités, ne seront jamais nuls. Dans ce cas précis, des associations dénoncent des insuffisances dans l'étude d'impact, en particulier sur le site à proximité de la forêt des Colettes, classé Natura 2000 ; concernant l'usage de l'eau, l'effet sur le niveau des nappes et leur qualité ; puis sur l'impact et les conflits d'usage des infrastructures routières et ferroviaires.

En parallèle, le soutien au projet se base sur l'activité économique créée et la nécessité de relocaliser la production minière. Les oppositions se résumeraient à un syndrome « *Not in my backyard* » (NIMBY, que l'on pourrait traduire par « pas dans mon jardin »), c'est-à-dire une opposition de principe, refusant le projet parce qu'il est près de chez soi, alors qu'il serait accepté s'il avait lieu ailleurs. Ces bénéfices économiques sont néanmoins discutés, car ils impliquent des

bouleversements sociaux similaires à ceux évoqués précédemment (migrations de profils qualifiés absents du bassin d'emploi, perturbation des prix du foncier), bien que potentiellement de moindre ampleur. L'opposition au projet se revendique plutôt d'une tendance « *Not in anybody's backyard* » (NIABY, transposé en français par « ni ici, ni ailleurs »), considérant que l'ouverture d'une mine de lithium en France, sans réflexion sur l'évolution des mobilités, n'aboutira pas à la fermeture de mines ailleurs dans le monde, mais viendra s'ajouter et accroître la quantité de lithium disponible sur le marché pour favoriser la mobilité via des véhicules électriques individuels lourds, potentiellement moins émetteurs de gaz à effet de serre, mais dont les impacts sur l'environnement sont conséquents.



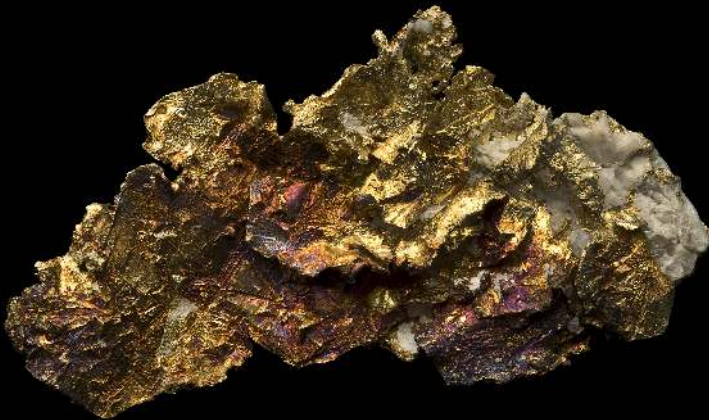
*Débat public organisé autour du projet d'ouverture d'une mine de lithium dans l'Allier.*

## Besoin ou demande, la question des modes de vie

Le débat public sur l'ouverture d'une mine de lithium dans l'Allier a mis en avant la question des usages des ressources minérales et la distinction entre la demande, toujours croissante, et les besoins, souvent discutables. L'opposition critiquait la volonté d'ouverture d'une mine sans réflexion et stratégie préalable sur une trajectoire de sobriété à suivre pour limiter la consommation de ressources minérales.

L'or est une autre ressource illustrant bien l'importance de questionner les usages au regard des impacts documentés de l'extraction minière. Environ 3000 tonnes d'or sont extraites chaque année. Contrairement

aux terres rares dont le nom est trompeur, l'or, comme les autres métaux précieux (argent, platinoïdes), est extrêmement peu concentré dans la croûte terrestre. Les gisements contiennent ainsi des teneurs de l'ordre de la dizaine de parties par million (1 ppm = 0,0001 %) ce qui nécessite d'extraire 300 millions de tonnes de roche chaque année pour produire l'or consommé.

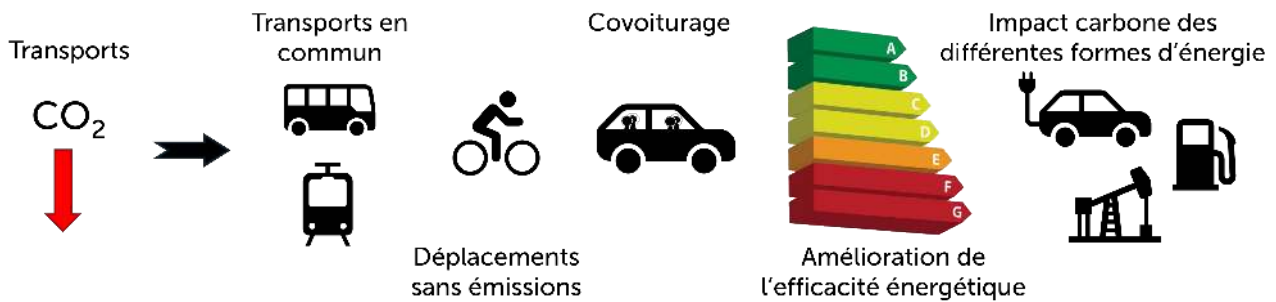


*Or, Equateur  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*

Pourtant, les applications industrielles de l'or, essentiellement dans l'électronique du fait de sa conductivité, ne représentent qu'environ 10 % de la consommation. Le reste est utilisé dans la bijouterie, stocké dans les banques centrales comme valeur refuge ou bien pour faire de la monnaie.

La réduction de l'usage des ressources minérales passe par la mise en œuvre dans les politiques publiques à différentes échelles du triptyque **sobriété** (satisfaire les besoins en limitant les usages au strict nécessaire et ainsi les impacts sur l'environnement), **efficacité** (capacité à satisfaire le même besoin avec une quantité moindre de ressource), **substitution** (remplacer un outil par un autre avec le même usage et une efficacité équivalente, mais dont l'impact est moindre sur l'environnement). L'ordre dans lequel sont appliquées les politiques publiques doit respecter cette succession, au risque d'être soumis à l'effet rebond. Lorsque l'on introduit un produit plus efficace sans contraintes sur le marché, la consommation est souvent démultipliée, annihilant les gains, voire augmentant les impacts. Ce paradoxe est bien illustré par l'éclairage. L'arrivée des LED a permis des gains d'efficacité conséquents avec une consommation de l'ordre de dix fois moindre comparée aux ampoules à incandescence. Pourtant, la consommation d'énergie n'a pas diminué du fait de la multiplication des points lumineux dans l'espace public et privé.

Afin de réduire efficacement les impacts évoqués et rendre acceptable l'extraction minière résiduelle qui permettrait de maintenir la qualité de vie actuelle, il est donc nécessaire d'actionner l'ensemble de ces leviers. Cela ne concerne pas seulement les évolutions techniques, qui relèvent



*Leviers d'action pour limiter les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) par les transports ; ces mêmes leviers pourraient être actionnés pour limiter la consommation de ressources minérales associés à la mobilité.*

de l'efficacité ou de la substitution, mais aussi, et en amont, les transformations sociales nécessaires pour diminuer la consommation.

Ces mutations socio-économiques ne peuvent pas reposer uniquement sur l'action individuelle. Cela a été bien démontré dans le cas des émissions de gaz à effet de serre, indiquant que des individus avec des comportements les plus vertueux possibles ne réussiraient à réduire leur empreinte que de 45 %, tandis qu'en extrapolant à l'ensemble de la population et en supposant que l'on réussisse à faire changer les comportements individuels, une réduction moyenne de 20 % des émissions semblait plus réaliste. Cela suppose donc que le reste repose sur l'action collective et ainsi sur des transformations socio-économiques fortes soutenues par une action politique efficace.

Pour cela, il faut d'abord identifier les verrous socio-techniques qui s'opposent aux changements. Un exemple bien connu est celui de la voiture individuelle qui, parfois, peut difficilement être remplacée car le réseau de transports en commun ou les infrastructures urbaines ne permettent pas de se déplacer autrement. Il faut ensuite expérimenter des actions collectives susceptibles de défaire les interdépendances existantes entre la consommation et les modes de vie tout en limitant les inégalités d'accès aux ressources et en les distribuant équitablement. Par exemple, réguler la publicité dans l'espace public pour limiter les incitations à la consommation non sollicitées.

L'importance de prendre en compte les inégalités sociales dans l'implémentation de ces mesures a pu être démontrée par la crise des « gilets jaunes » : une écotaxe indiscriminée sur les carburants a été largement contestée par une large frange des citoyennes et citoyens qui la subissait sans avoir d'alternative.

Enfin, il faut donc institutionnaliser les changements via des processus démocratiques susceptibles de les rendre acceptables par l'ensemble de la population, à l'image de la Convention citoyenne sur le climat. Celle-ci a permis de faire ressortir des mesures de sobriété parfois fortes et contraignantes, mais unanimement acceptées au sein d'un groupe hétérogène représentatif de la population.



*Spodumène, Afghanistan  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*

# Bibliographie

---

BIGO A. *Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement.* Thèse (2020).

CHANGLE Wang et al., Deciphering the source of banded iron formations in the North China Craton, *Precambrian Research*, 402, 107298, (2024).

EJAtlas, et al. *The Global Environmental Justice Atlas: ecological distribution conflicts as forces for sustainability.* *Sustain Sci* 13, 573–584 (2018).

EKINS P., HUGHES N., et al. *Potential and Economic Implications : A report of the International Resource Panel.* Resource Efficiency, UNEP (2016).

ELHACHAM E., BEN-URI L., GROZOVSKI J. et al. *Global human-made mass exceeds all living biomass.* *Nature* 588, 442–444 (2020).

PIGNEUR J., TOLEDANO A., CHATELIN S., TAILLARD N. Le lithium : un défi écologique majeur pour une mobilité décarbonée. Association négaWatt. Valence, France (2024).

TORO L., MOSCARDINI E., BALDASSARI L., FORTE F. & FALCONE I., COLETTA J. & TORO L. *A Systematic Review of Battery Recycling Technologies: Advances, Challenges, and Future Prospects.* *Energies* (2023).

VIDAL O., ROSTOM F., FRANCOIS C., & GIRAUD G. *Global trends in metal consumption and supply: the raw material–energy nexus.* *Elements : An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 13(5), 319-324 (2017).

VIDAL O., ROSTOM F., FRANCOIS C., & GIRAUD G. *Prey–Predator Long-Term Modeling of Copper Reserves, Production, Recycling, Price, and Cost of Production* (2019).

## Bibliographie

---

IEA, 2021. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. IEA, Paris, France.

IEA, 2025. Global Critical Minerals Outlook. IEA, Paris, France.

OECD, 2019. Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences. OECD, Paris, France.

SystExt, 2021. Rapport d'étude, Controverses minières - Volet 1 · Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales, Caractère prédateur et dangereux · Techniques minières · Déversements volontaires en milieux aquatiques · Anciens sites miniers. SystExt, Paris, France

SystExt, 2022. Rapport d'étude | Controverses minières - Volet 2 · Exploration et exploitation minières en eaux profondes. SystExt, Paris, France.

SystExt, 2023. Rapport d'étude | Controverses minières - Volet 2 · Meilleures pratiques et mine "responsable". SystExt, Paris, France.

U.S. Geological Survey, 2025. Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey, Reston, Va, USA.

WWF France, Rapport Métaux critique \_0911. Métaux Critiques : l'impasse des SUV.

Rapport CIDSE 2018. Du minerai à la voiture.

## Cédits photographiques

- © Alain Jeanne-Michaud (A.Mi.S.)/ Coll. Minéraux, Sorbonne Université - Dépôts de l'association des Amis de la collection de Minéraux de Sorbonne Université (A.Mi.S.). p.6, 12, 22, 37, 41, 45, 49
- © Pierre Kitmacher / Coll. Minéraux, Sorbonne Université. p.15
- © Licence CC-BY-NC-ND  
Compound Interest 2014. p.18  
European Chemical Society. p.18  
Fresque du numérique. p.27
- © Figure inspirée de Changle Wang et al., Precambrian Research, 402 (2024). p.23
- © Cariboo Regional District. p.30
- © Véronique de Viguerie / Paris Match. p.33
- © Figure tirée de Vidal, O., Rostom, F. Z., François, C., & Giraud, G. (2019). p.38
- © WWF Belgique. p.40
- © Guy Christian/Hemis, AFP. p.42
- © Commission nationale du débat public. p.44





Collection de Minéraux  
SORBONNE UNIVERSITÉ



Open Access  
Sorbonne University  
Digital Repository

