Ruée minière au XXIe siècle: jusqu'où les limites seront-elles repoussées?

Conférence de l'USI 2022 *Unexpected Source of Inspiration* - ***Aurore Stéphant*** - *Fév 2023*

Aurore Stéphant est ingénieure et géologue minier, spécialiste des activités minières et de leurs impacts humains, sanitaires, sociaux et environnementaux, membre de l'association SystExt (Systèmes extractifs et Environnements)

1/ Réalité des filières minérales : industrie prédatrice et dangereuse

1.1 Rareté géochimique et cortège de substances associées

Le métal ne se trouve pas sous forme pure dans les gisements

- **Tous les métaux sont rares** sauf l'aluminium, le fer, le magnésium, le manganèse, le titane.
- La TENEUR D'EXPLOITATION, la concentration en métal à partir de laquelle un minerai est techniquement et financièrement exploitable, est généralement métaux très faible: voir tableau ci contre
- Le STÉRILE, c'est la roche présente sur le site mais non exploitable
- Le MINERAI, c'est la roche contenant le minéral ciblé à une concentration économiquement exploitable: *Ex: Bauxite, roche rouge riche en aluminium*
  Le minerai reste un amas variablement complexe de minéraux.
- Chacun de ces MINÉRAUX, est une association chimique dans laquelle on va pouvoir retrouver des éléments métalliques: *Ex: Tungstate de calcium, Sulfure de cuivre*

Métal	**Teneur d'exploitation**	*Minerai extrait **pour 1g de métal**	Pour 1 tonne de roche
Fer	30 à 66%	1,5 à 3 g	300 à 660 kg
Aluminium	25 à 30%	3 à 4 g	250 à 300 kg
Zinc	4 à 20%	5 à 25 g	40 à 200 kg
Nickel	1 à 3%	33 à 100 g	10 à 30 kg
Cobalt	0,5 à 2,5%	40 à 200 g	5 à 25kg
Cuivre	0,3 à 2%	50 à 150g	3 à 20kg
Uranium	0,1 à 0,3%	0,33 à 1 kg	1 à 3kg
Lithium	0,05 à 0,15% salars	0,66 à 2 kg	500g à 1,5kg
Indium	0,01%	10 kg	100g
Gallium	0,003 à 0,008% bauxite	12,5 à 33 kg	30 à 80g
Platine	0,0003% à 0, 0015%	66 à330kg	3 à 15g
Or	0,0001%	1 Tonne	1g

FER &ALU: On trouve encore des gisements concentrés ce qui explique leur coût relativement bas rapport à leur utilité.

CUIVRE: Bien que sa teneur d'exploitation soit faible, passée de 2% à moins de 1%, des quantités phénoménales sont extraites: environ 22 millions de tonnes par an.
Donc on déplace chaque année des milliards de tonnes de roches pour l'obtenir.

OR: Pour fabriquer une alliance de 5g il a fallut au bas mot extraire 6,5 Tonnes de roches, dont 1Tonne de minerai.

*Au tableau ci contre, fait à partir des chiffres de systext, il faut ajouter les volumes colossaux de stériles extraits et broyés. Cf chap suivants.

**Pour un ou deux métaux ciblés économiquement,
vient tout un cortège de métaux libérés à la surface,
dont certains très toxiques: plomb, cadmium, mercure, arsenic ...**

Roue de complémentarité de certains des métaux[1] sollicités pour le PERM EPONA

En **GRAS**, métaux EPONA ; En **ROUGE**, métaux « dangereux » (Dir. EU ROHS)

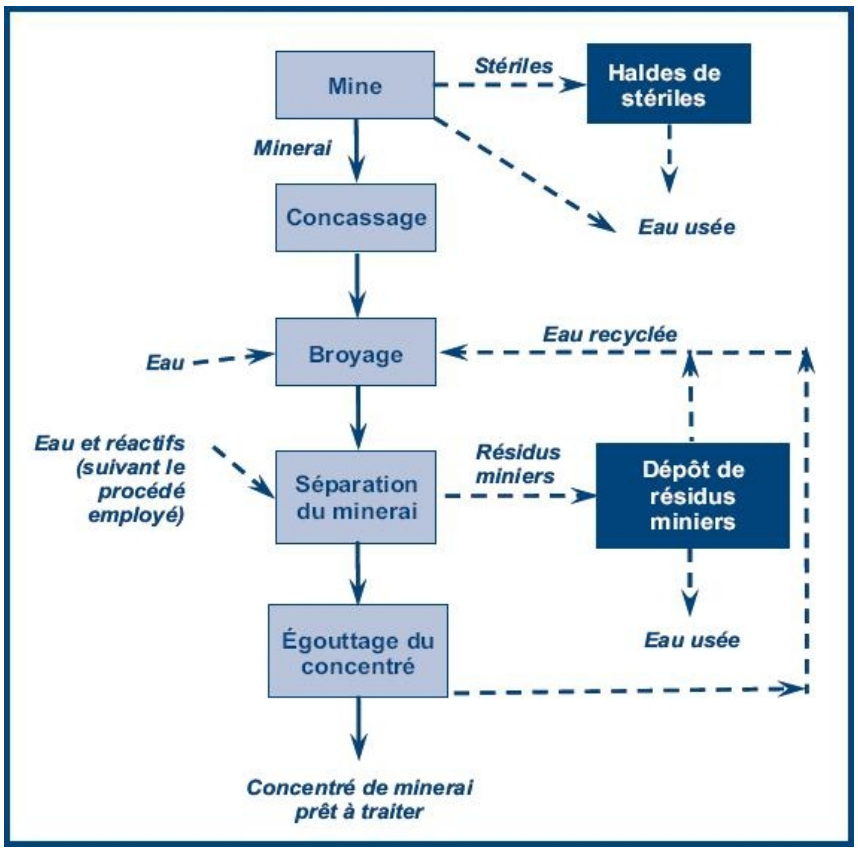
100 % valorisé	75 %	50 %	25 %	0 % valorisé
Au Or			**Ag Argent** **Zn Zinc** **Cu Cuivre** **Sb Antimoine** **U** Uranium	**Hg** Mercure **As** Arsenic **Ba** Baryum
Ti Titane **Zr** Zirconium **Hf** Hafnium			**Ho Holmium** **Y Yttrium** **La Lanthane** **Ce Cerium** **Pr Praseodyme** **Nd Neodyme** **Sm Samarium** **Eu Europium** **Gd Gadolinium** **TbTerbium** **Dy Dysprosium** **Er Erbium** **Tm Thulium** **Yb Ytterium** **Lu Lutecium**	**Th** Thorium **Fe** Fer
Cu Cuivre **Se** Selenium **Te** Tellure		**Mo Molybdene** **Co Cobalt** **Re** Rhenium	**Ag Argent** **Bi Bismuth** **Zn Zinc** **Sn Etain** **In Indium** **Au Or** **U** Uranium	**Ag Argent** **Bi Bismuth** **Zn Zinc** **Sn Etain** **In Indium** **Fe** Fer **Tl** Thallium
Zn Zinc **Cd** Cadmium **In Indium**	**Ge Germanium**	**Ag Argent**	**Ga** Gallium **Sn Etain** **Cu Cuivre** **Au Or**	**Tl** Tellure **Se** Selenium **Ba** Barium **Pb Plomb** **As** Arsenic **Hg** Mercure
Pb Plomb	**Bi Bismuth**	**Sb Antimoine**	**Te** Tellure **Cu Cuivre** **Zn Zinc**	**Hg** Mercure **As** Arsenic **Se** Selenium **Ba** Barium **In Indium** **Tl** Tellure
Sn Etain			**Nb Niobium** **W** Tungstène **Sb Antimoine** **In Indium** **Bi Bismuth** **Ta Tantale** **Er Erbium** **Ho Holmium** **Dy Dysprosium** **Tb Terbium** **Gd Gadolinium** **Eu Europium** **Sm Samarium** **Nd Neodyme** **Pr Praseodyme** **Ce Cerium** **La Lanthane** **Y Yttrium**	**As** Arsenic **Th** **Sc** Scandium **Ag Argent**
Pt Platine **Os** Osmium **Ru** Ruthénium **Ir** Iridium **Rh** Rhodium		**Pd** Palladium		**Ag Argent** **Cu Cuivre** **Cr** Chrome **Ni** Nickel **Co Cobalt** **Au Or**

1 Adapté de Systext Nov. 2021

1.2 Processus de récupération de métal laborieux

Un processus en plusieurs étapes, le cas du cuivre:

1	**Séparation** du minerai et du stérile.	>	MINERAI	0,4 à 2% de Cu
2	**Concentration**/ traitement du minerai	>	CONCENTRÉ	31% de Cu Sulfure de cuivre
3	**Extraction chimique** / Métallurgie ou Pyrométallurgie	>	BLISTER	98 à 99,5 % de Cu (pyromét)
4	**Raffinage**	>	CATHODE	99,99% de Cu



Source : https://www.canada.ca/fr/ (gouvernement du Canada)

Un processus coûteux en énergie, le cas de l’or:

Une mine d’or de taille moyenne consomme :

- autant d’eau qu’une population de 80 000 habitants en France
- autant d’électricité que 31 000 foyers en France.

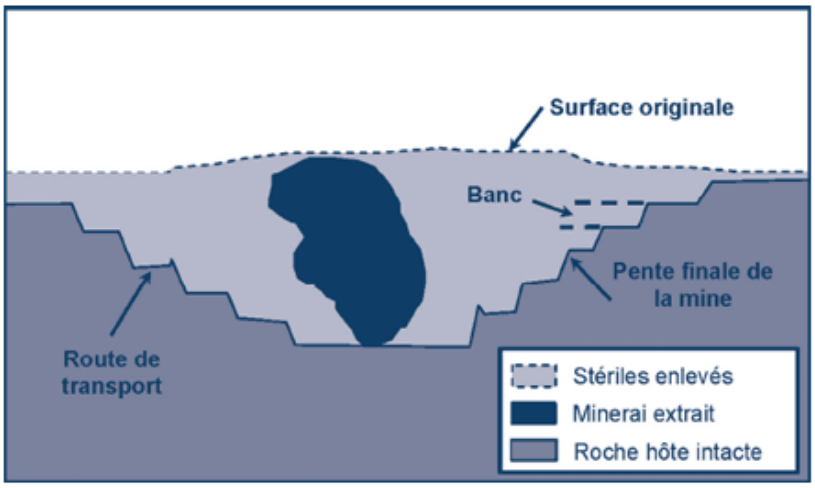
1.3 Quantité considérable de déchets et d'effluents miniers

L'industrie minière est le 1er producteur de déchets solides, liquides, gazeux, tous secteurs industriels confondus!

Exemples d'une mine de Cuivre, Palabora, Afrique du Sud



Blog « objection de croissance » https://moinscplus.blogspot.com/2011/02/quel-futur-pour-les-metaux.html



https://www.canada.ca/fr/ (gouvernement du Canada)

Problèmes liés au déchets miniers

- **Emprise au sol** de de grands volumes de déchets solides et/ou liquides.
  - STÉRILES: roches non valorisées
  - RÉSIDUS: ce qui reste du minerai après traitement
- **Drainage minier toxique**: le contact de l'eau avec la roche broyée libèrent des métaux toxiques dès les faibles doses : . et dans bien des cas de l'acidité, type acide sulfurique.
  - Certains métaux sont toxiques dès les faibles doses :*plomb, arsenic, mercure, cadmium,..*
  - D'autres le sont à doses plus fortes : *nickel, zinc,.*
  - D'autres encore le sont sous certaines formes : *chrome, cuivre,...*
- **Pollutions chimiques** liés aux solvants de traitements et aux lubrifiants des machines.

Les déchets miniers ne se dégradent jamais, on ne peut dépolluer un site minier!

1.4 Dégradation irréversible de tous les milieux

Ex. de la mine de lignite à Hambach, Allemagne	Ex. de la mine de nickel et palladium à Norilsk, Russie	Ex. de la mine de cuivre et or à Grasberg, Indonésie
 Cc by 2.0 Clemens Vaster 2019	 Cc By NC 3.0 Una Ventana al Mundo	 Wikipédia
Emprise de 44 km2 (-> 85km2) 1ère cause de gaz à effet de serre en Europe 5200 personnes déplacées 90% d'une forêt primaire détruite (-> 100%)	Produit plus de dioxyde de soufre que la plupart des volcans, autant que la France en 1 ans En sept 2016 pollution de la rivière Dadlykan suite au débordement d'un parc à résidus miniers: magenta	87 millions de tonnes de déchets /an déversés volontairement du haut de la montagne 250 km2 d'eaux de surfaces et souterraines définitivement pollués Emprise au sol de 2,6 millions d'hectares, soit l'équivalent de la Belgique,

Exemples d'impacts pour des métaux visés dans EPONA

L'OR	Les TERRES RARES
C'est le métal produisant **le plus de déchets par gramme** produit. • Extraction : des montagnes de stériles qui peuvent générer du **drainage minier acide** (l'eau devient littéralement de l'acide sulfurique au contact de la roche exposée). • Traitement : pour extraire quelques grammes, on utilise du **cyanure,** ou plus anecdotiquement du mercure, pour séparer l'or de la roche. Ces produits finissent souvent dans les rivières.	Contrairement à leur nom, ces métalloïdes ne sont **pas plus rares que les autres**, mais peu faciles à déceler ils ont été découverts plus tard, et leur concentration est souvent assez faible. • Extraction : les minerais de terres rares contiennent souvent du Thorium ou de l'Uranium. L'exploitation peut générer poussières et déchets **radioactifs**. • Traitement : leur séparation nécessite **des centaines de bains d'acide et de grandes quantités de solvants chimiques.**

1.5 Augmentation attendue de tous les impacts

Un processus DE PLUS EN PLUS LABORIEUX!

- Les teneurs d'exploitation diminuent
- Les gisements proches de la surface se raréfient
- Les minerais exploités sont de plus en plus complexes et réfractaires

➔ Encore plus de traitements chimiques, d'eau, et d'énergie pour obtenir la même quantité

➔ On creuse plus profond, sur de plus larges surfaces

➔ Recherche de sites dans des zones protégées, habitées, ou à forte valeur écologique

Une augmentation exponentielle de la production

Compte tenu des projections pour les énergies renouvelables (véhicules électriques , etc) : les impacts pourrait surpasser ceux qu'on avait essayé d'éviter sur le changement climatique.

D'ici 2030-2050, l'industrie minière cherche à relever un défi paradoxal : extraire **plus de métaux que ce qui a été extrait durant toute l'histoire** de l'humanité pour réussir la transition énergétique, tout en faisant face à des contraintes naturelles de plus en plus sévères.

Métal	Année	Teneur moyenne du minerai	Production mondiale annuelle
Cuivre	1975	1,20%	7,5 Millions de tonnes
	2000	0,85%	13 Millions de tonnes
	2025	0,50%	22 Millions de tonnes
Or	1975	~10 g / tonne	1500 tonnes
	2000	~3 g / tonne	2500 tonnes
	2025	~1,2 g / tonne	3600 tonnes

Sources compilées USGS et études de Simon Michaux / Gavin Mudd

2/ Modèle de développement et matières premières minérales : les dérives

2.1 Économie de la croissance basée sur des ressources minérales

La quantité de métaux extraits ne cesse d'augmenter.

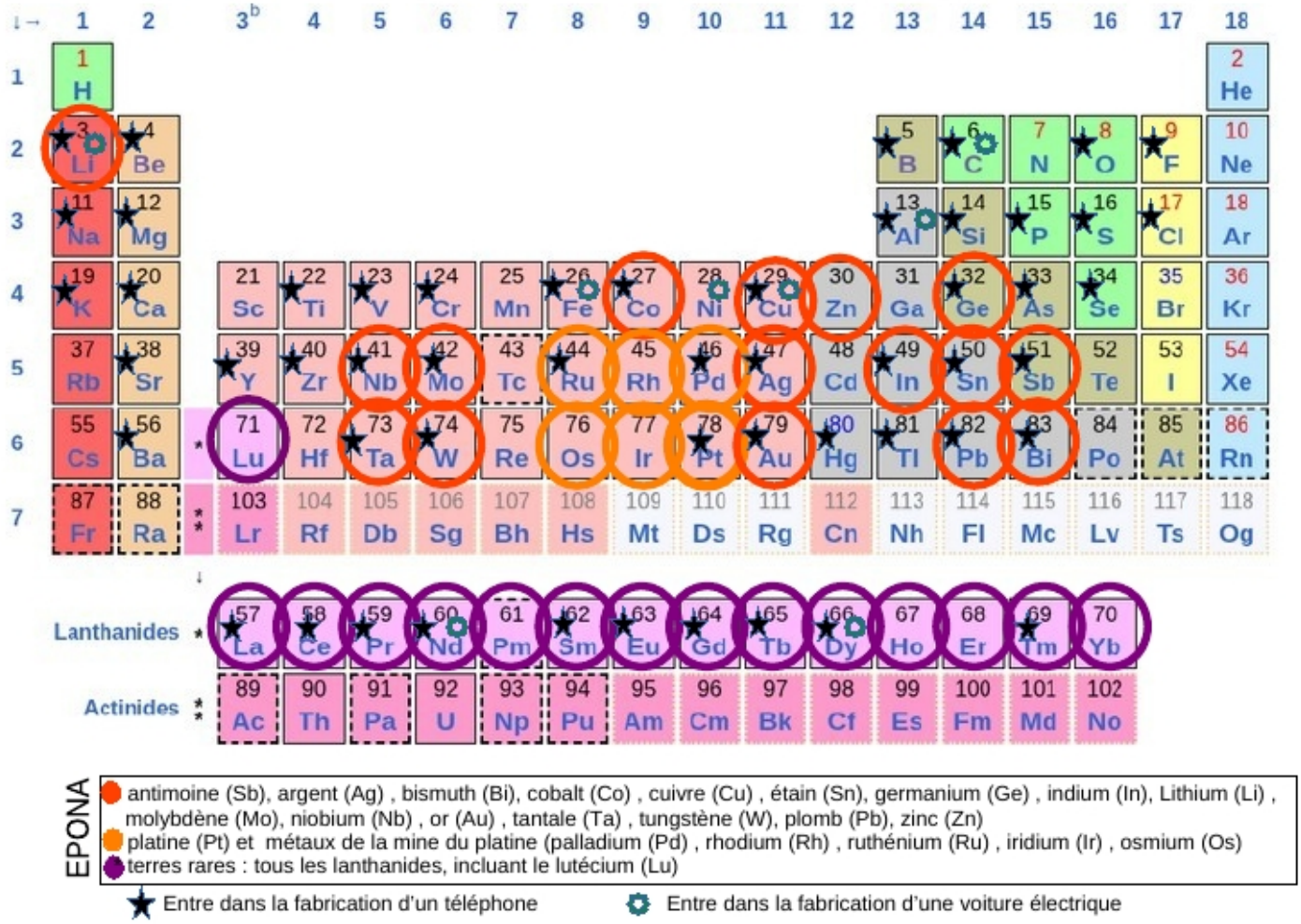
Toutes les révolutions industrielles sont basées sur les matières premières minérales:
> Machine à vapeur pour faciliter l'accès au charbon
> Acier-sidérurgie et chemin de fer
> Uranium nucléaire et métaux de spécialité pour l'électronique

Au fur et à mesure des inventions technologiques, les sources d'énergie ne se succèdent pas, elles s'accumulent. (JB Fressoz)

2.2 Sollicitation toujours plus grande de la table de Mendeleïev

Dans un smartphone : **60 à 70 éléments différents** de la table de Mendeleïev.

Dans un véhicule électrique, on trouve 75 des 86 éléments naturels du tableau de Mendeleïv[2].
Pour **une seule** voiture électrique, rien que **la fabrication des aimants** du moteur nécessite 1 à 2kg de Néodyme (Nd) et le Dysprosium (Dy), **deux terres rares visées par EPONA**. Pour obtenir cette quantité, il faut d'abord extraire 10 à 20 tonnes de stériles, pour accéder au minerai brut. Il en faudra ensuite entre 500kg et 1 tonne de minerai brut, pour avoir nos 1 à 2kg de matière pure.



Les éléments recherchés par le PERM EPONA. *Ils sont entourés.*

2.3 Implication des modèles actuels liés à la transition énergétique

En ajoutant à la croissance économique déjà en place, la quantité de métaux requise pour les scénarios de transitions énergétiques proposés actuellement, via des véhicules électriques, et cætera... on arrive à ce constat impossible:

«la quantité de métaux à produire au cours des 35 prochaines années, dépasserait la quantité de métaux extraite depuis l'antiquité»

2 Le tableau de Mendeleïev est un classement de tous les éléments chimiques qui existent dans l'univers (comme l'or, le fer ou l'oxygène), organisés par ordre de complexité et regroupés selon leurs propriétés communes.

3/ Pour un changement de paradigme

3.1 Transformer les pratiques dans les filières minérales

- **Interdire les pires pratiques minières**: déversements volontaires de déchets miniers directement dans les cours d'eau, mines à déplacement de sommet, lixiviation en tas[3] , « cyanurisation », etc.)
- **Abandonner le terme «meilleurs pratiques disponibles»**, arnaque de langage, et rechercher des pratiques vraiment respectueuses de l'Homme et de la Nature.
- **Définir des «No-Go Zones»** (zones interdites à la prospection minière) pour protéger les espaces à haute valeur écologique et les zones indispensables à la vie des population autochtones et des communautés locales.
- **Prendre en compte tous les enjeux environnementaux, humains et sociaux** pour évaluer l'impact des filières minérales ; et pas seulement les émissions de gaz à effet de serre.
- **Améliorer la gouvernance et la traçabilité des filières minérales**, tout au long de la chaîne.

3.2 Modifier le rapport aux métaux

- **Interdire le gaspillage métallique** : réserver les métaux pour les usages qui ne peuvent pas s'en passer, contraindre la mise en décharge et l'abandon
- **Développer des conceptions véritablement sobres et «low-tech»** : arrêter la course à la performance, simplifier les fonctionnalités.
- **Construire des dispositifs non obsolescents** : garantir les durées minimum d'utilisation, maximiser les pièces détachables et changeables.
- **Favoriser la réutilisation et la recyclabilité des appareils** : appliquer des taux de recyclabilité minimum, diminuer drastiquement les usages dispersifs[4]
- **Privilégier les métaux provenant des filières de recyclage** et y investir massivement.

3.3 Renouveler un modèle de développement

- **Sensibiliser à la matérialité des biens** de consommation et de notre modèle de développement.
- **Sortir de la mythologie de la croissance «verte»**, cf «extractivisme vert» : *«Chaque nouvelle technologie verte comporte un risque de violence extractiviste et d'exploitation des travailleurs»* (War on Want 2021)
- **Mettre en place des plans d'approvisionnement cohérents** par rapport au développement des pays concernés.
- **«Dénumériser»** les sociétés.
- **Diminuer massivement la demande et le besoin en métaux primaires** (métaux non recyclés)

---

3 Technique d'extraction des métaux solubles (or, argent, cuivre, zinc, uranium, bauxite, cobalt, nickel…) par un solvant (le cyanure de sodium pour l'or et l'argent, l'acide sulfurique, le chlore…). Des tas de minerais pouvant atteindre 100m de haut sont créés sur une surface étanche. La solution chimique est répandue au sommet du tas. Au cours de sa percolation, elle se charge avec les métaux recherchés. Le résultat est récupéré à la base dans des drains.

4 L'usage dispersif d'un produit est un usage qui disperse les éléments constitutifs de ce produit dans l'environnement, et qui rend ces éléments impropres au recyclage. Si le produit est toxique, les déchets toxiques dispersés sont impossibles à récupérer.