

La Disponibilité Durable des Ressources Minérales

Prof. Dr. Ir. **Eric PIRARD**

Ressources Minérales

- 1. Épuisement des ressources*
- 2. Développement durable*
- 3. Recyclage*

Un monde de ressources

Economie Sphérique

Atmosphère

Biosphère
Ressources Agricoles



Géosphère
Ressources du sous-sol

Ressources du sous-sol

De quoi parle-t'on ?



- Ressources Energétiques
 - Pétrole, Gaz, Charbon, Lignite,...
 - Uranium
 - *Non-renouvelables*
- Ressources en Eau
 - *Vitales, Epurables*
- Minéraux Industriels
 - Sables, agrégats, gypse, ...
 - Kaolin, talc, diatomée,...
 - Gemmes
 - *Non-recyclables, synthétisables*
- Ressources Métalliques
 - Métaux de base
 - Métaux précieux
 - *Recyclables*

Ressources Minérales

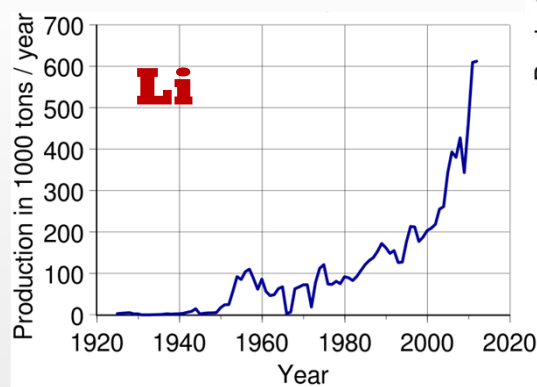
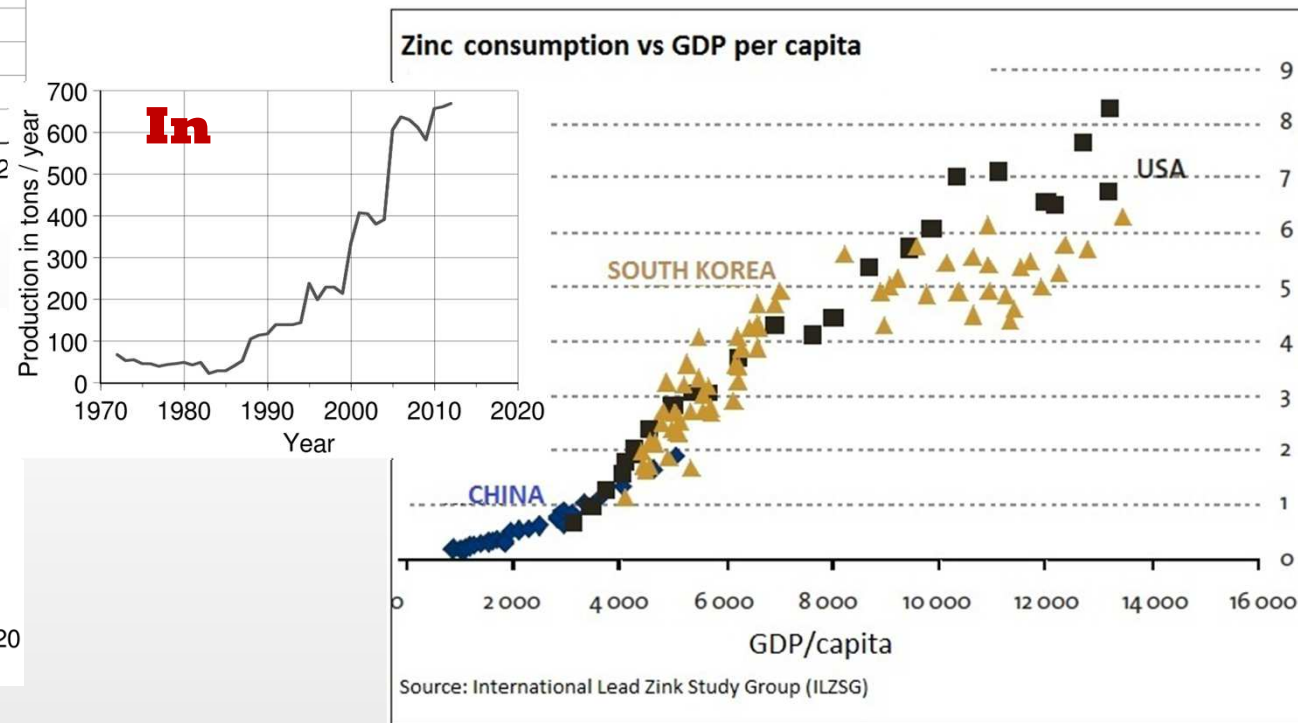
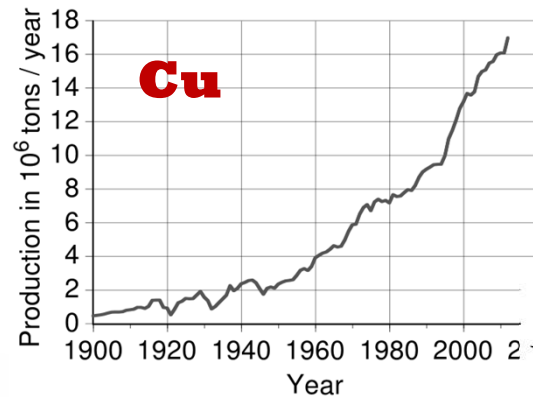
Épuisement ?



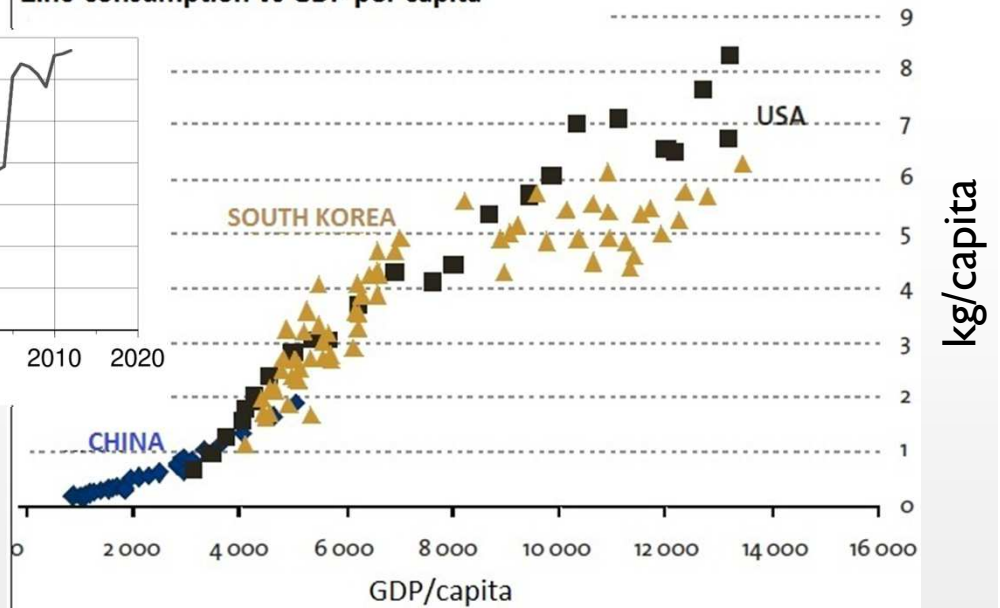
Ressources Minérales

Frénésie

- Croissance exponentielle de la production de tous les métaux



Zinc consumption vs GDP per capita



Source: International Lead Zinc Study Group (ILZSG)

Ressources & Réserves

Il n'y en a plus que pour 20 ans!

- Vision statique
 - Réserves (ex. <http://minerals.usgs.gov/>) vs. Taux d'extraction

| Commodité | Réserves 1999 | Production annuelle 2000 | Durée de vie scenario +5% |
|-----------|---------------|--------------------------|---------------------------|
| Aluminium | 25 Gt | 123 Mt | 48 a |
| Cuivre | 340 Mt | 12 Mt | 18 a |
| Plomb | 64 Mt | 3,1 Mt | 14 a |
| Nickel | 46 Mt | 1,1 Mt | 22 a |
| Étain | 8 Mt | 207 kt | 21 a |
| Zinc | 190 Mt | 7,75 Mt | 16 a |

ZINC in 2016
200 Mt (world reserves)
13,4 Mt (world annual production)

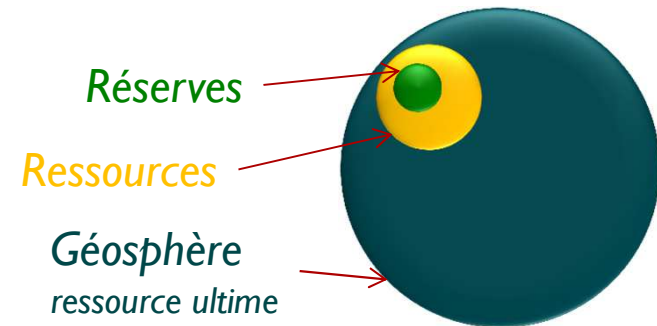
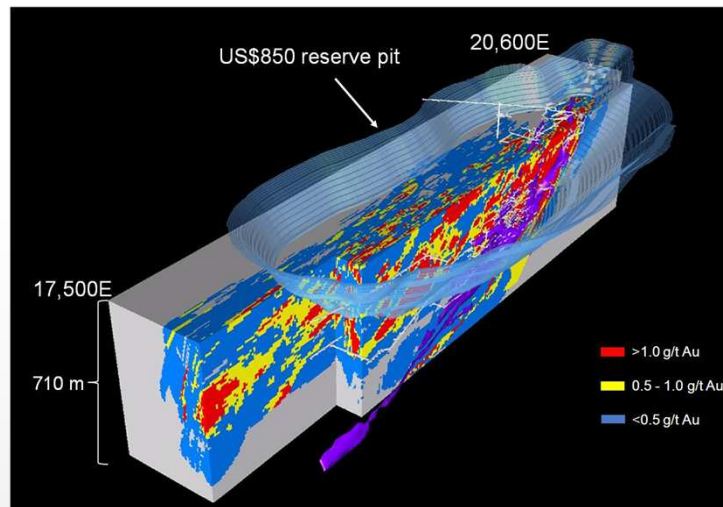


D'après « **Breaking New Ground** »
Report of the Mining, Minerals & Sustainable Development Project
Int. Institute for Environment and Development (IIED), 2002

Ressources & Réserves

Il y a 100 ans qu'il y en a pour 20 ans

- Vision dynamique
 - RESSOURCES (inferred, indicated, measured)
 - Les tonnages identifiés par prospection



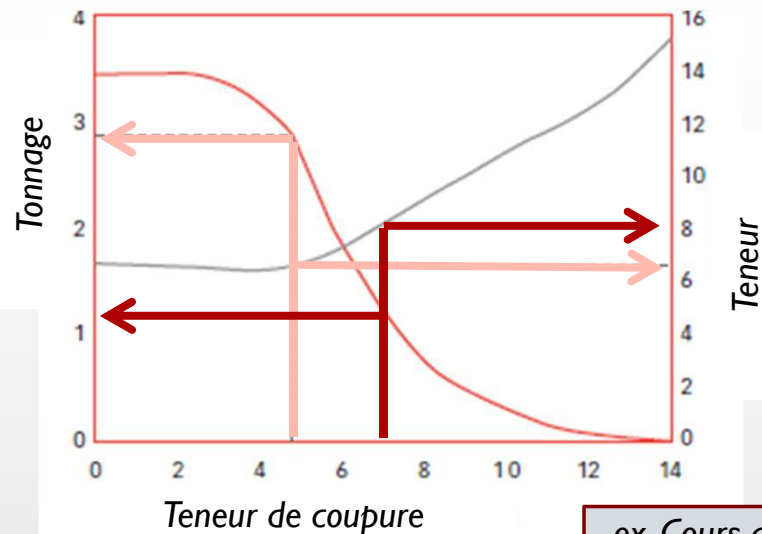
- RESERVES
 - Un sous-ensemble **exploitable aujourd'hui** selon des critères

Techniques
Économiques
Sociaux
Environnementaux, ...

Ressources & Réserves

Il y a 100 ans qu'il y en a pour 20 ans

- Vision dynamique
 - Les réserves augmentent avec :
 - Exploration accrue
 - ✓ Le sous-sol est encore largement méconnu (Géologie 3D!)
 - Augmentation du cours du métal (choix économique)
 - Diminution des coûts opératoires (innovation technologique)

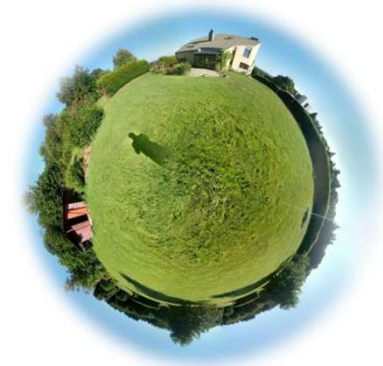


ex. Cours du métal + 30%
▶ Tonnage total + 100 %
▶ Teneur moyenne -25%

Ressources & Réserves

Géochimie de mon jardin

- Un peu de tout...
 - Soit un jardin de 1000 m² sur 1m profondeur (2000 t de schiste)
 - Tous les métaux y sont en proportions variables



| Élément | Tonnage |
|---------|---------|
| O | 930 t |
| Si | 660 t |
| Al | 160 t |
| Fe | 60 t |
| Ti | 8 t |
| Zn | 150 kg |
| Cr | 122 kg |
| ... | ... |

| | |
|-----|-------|
| Li | 60 kg |
| Ni | 54 kg |
| Nd | 54 kg |
| Cu | 46 kg |
| Ga | 34 kg |
| Gd | 8 kg |
| ... | ... |

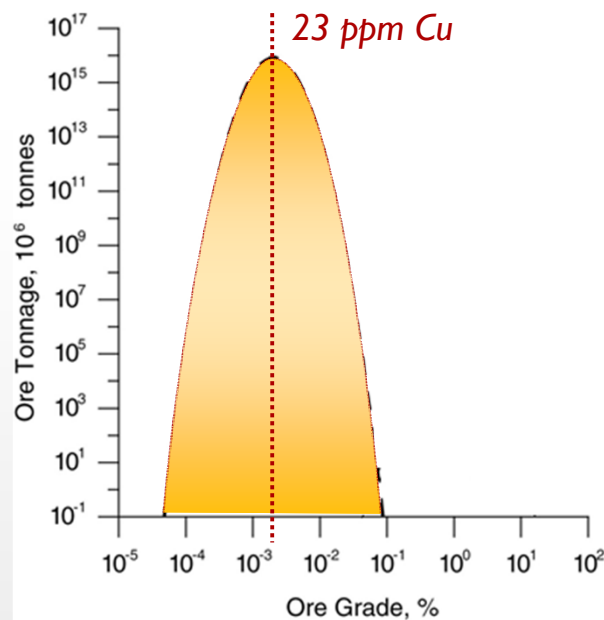
| | |
|-----|--------|
| As | 22 kg |
| Ge | 3,4 kg |
| U | 5,4 kg |
| Hg | 130 g |
| Au | 2 g |
| Te | < 2 g |
| ... | ... |

- Il y a assez de ressources pour satisfaire mes besoins... à prix d'or !

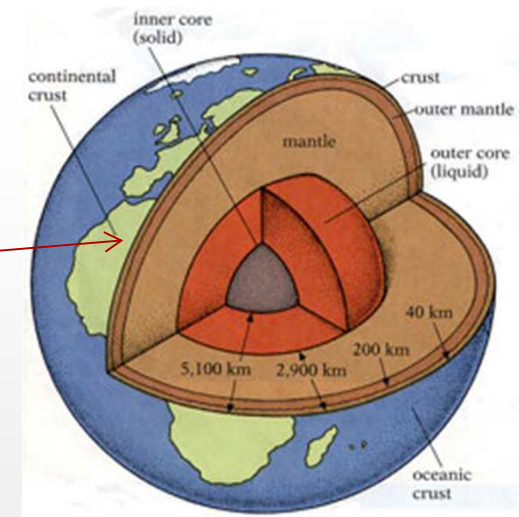
Ressources & Réserves

Ressources de la croûte terrestre

- Ressource Ultime
 - Contenu total de la croûte continentale
 - Epaisseur arbitraire de 18 km (?)



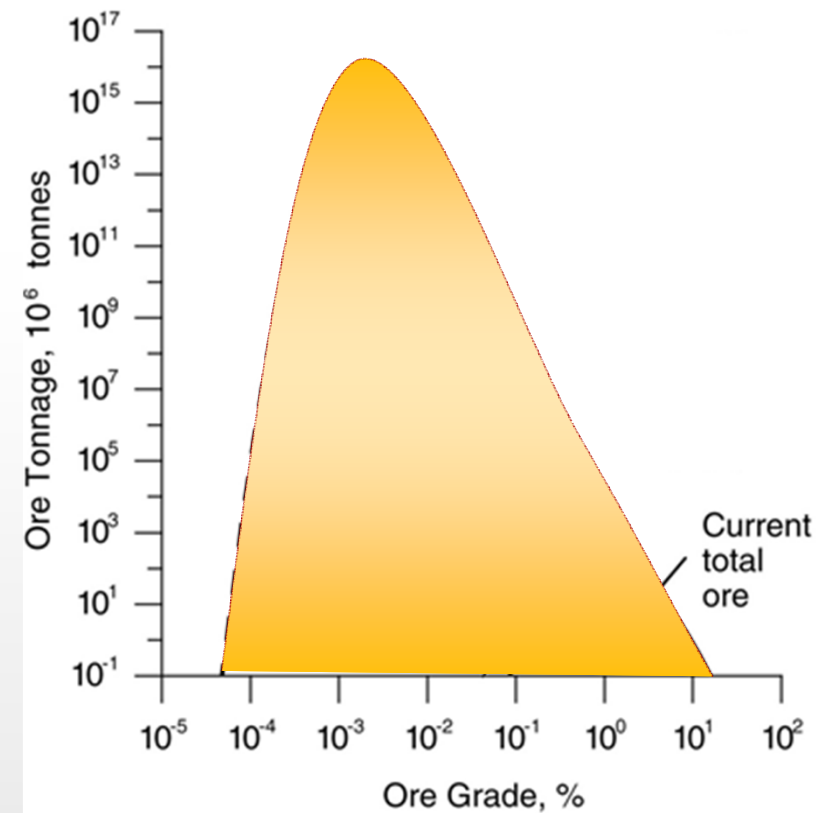
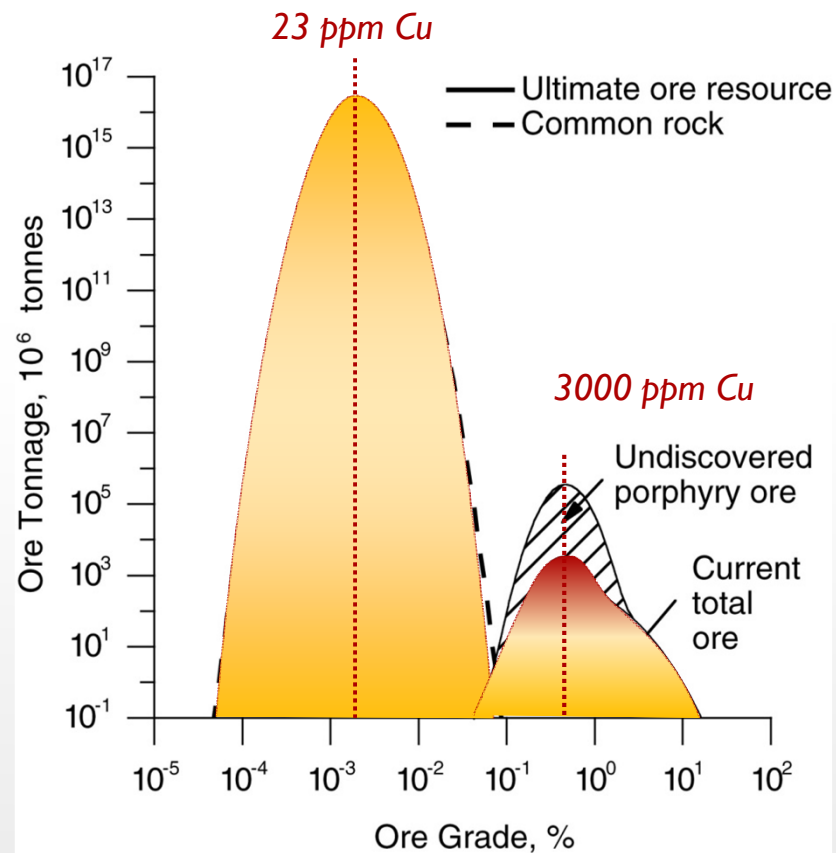
Géosphère
ressource ultime



Ressources & Réserves

Où est le pic ?

- Distribution hypothétique tonnage/teneur du Cu

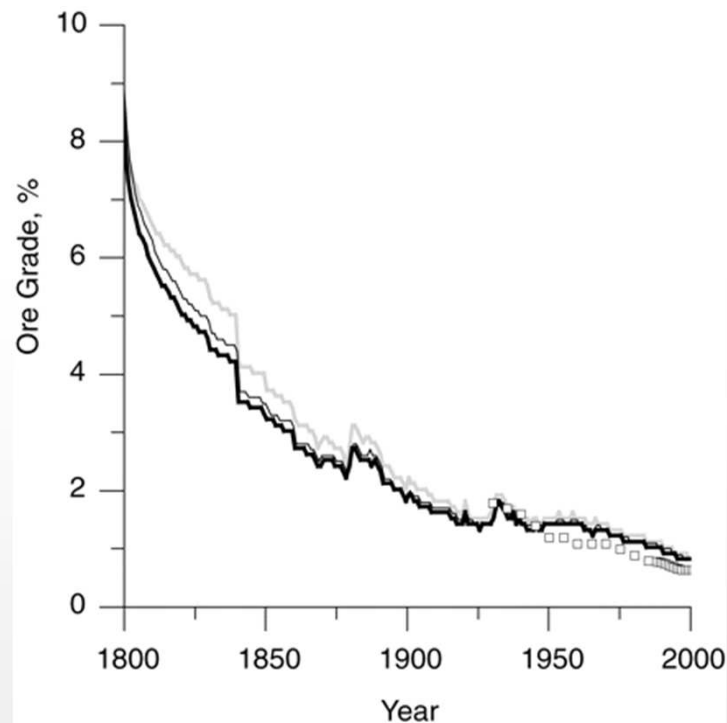


Gerst, 2008, Economic Geology, Yale Center for Industrial Ecology

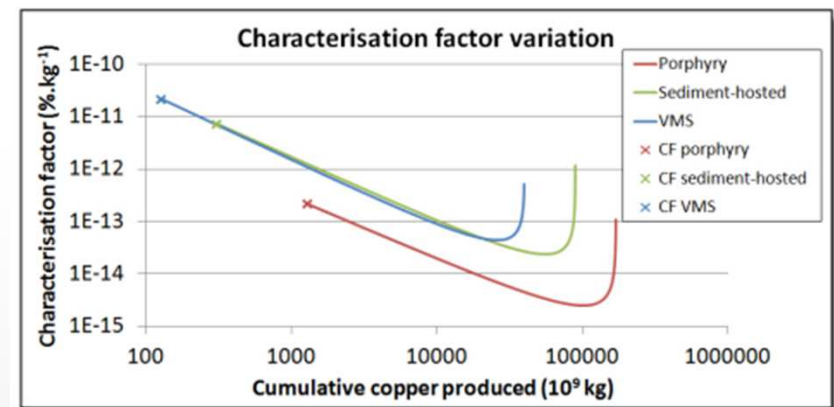
Ressources & Réserves

Épuisement de la ressource

- Diminution des teneurs moyennes des gisements
 - Modèle pour un facteur de caractérisation en ACV ?



Gerst, 2008, *Economic Geology*, Yale Center for Industrial Ecology



(Vieira et al., 2012)

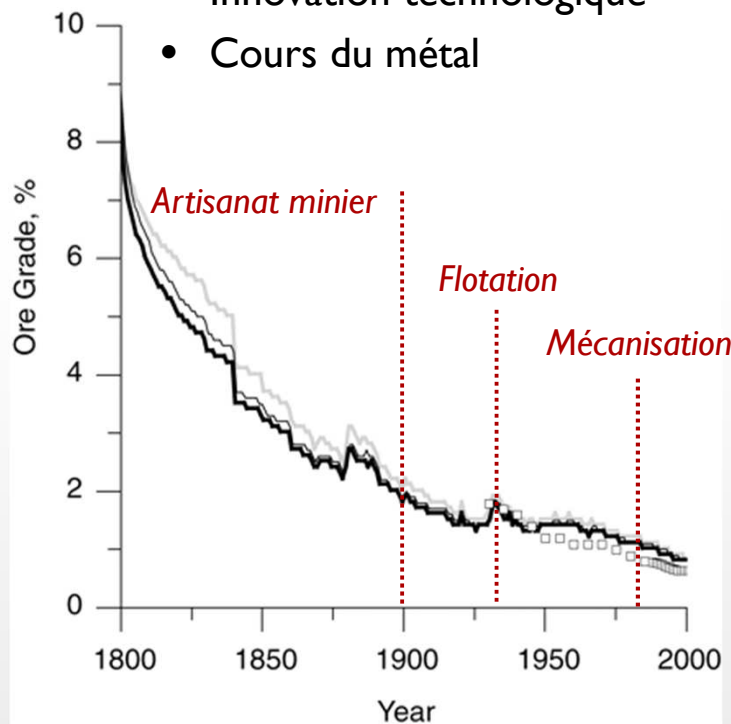
Ressources & Réserves

Épuisement de la ressource

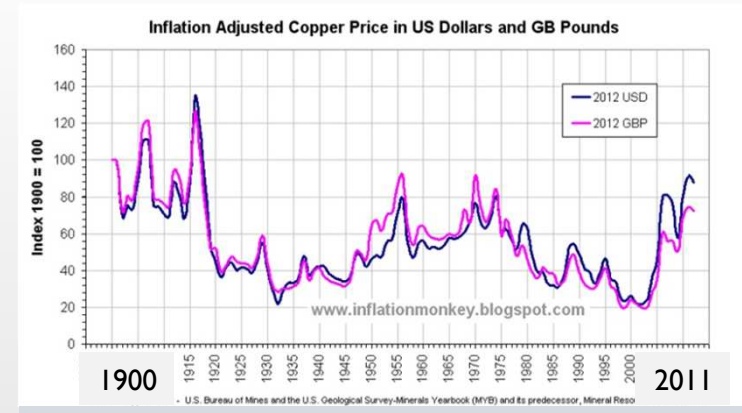
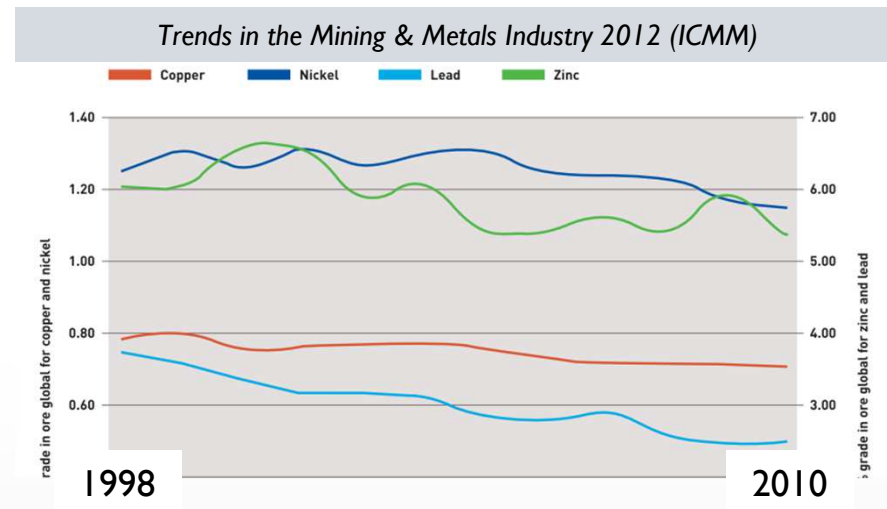
- Diminution des teneurs moyennes des gisements

- Résultante croisée de

- Croissance de la production
 - Innovation technologique
 - Cours du métal



Gerst, 2008, Economic Geology, Yale Center for Industrial Ecology



USGS Prix du Cuivre en \$ constants sur le XX^{ème} siècle

Ressources & Réserves

Conclusions

- Les ressources sont encore largement inexplorées
- Le cours du métal a un impact direct sur les tonnages / teneurs
 - Cours ↗ - Tonnages disponibles ↗ - Teneur moyenne ↘
- L'innovation technologique libère de nouvelles réserves



Bioheap leaching à Talvivaara (FIN)
1.3 Mt @ 0,23 % Ni ; 0,02% Co; 0,13 % Cu; 0,5 % Zn

Ressources Minérales

Développement Durable



Ressources et Développement Durable

Mémoire d'atomes

- Flux mondial de ressources



Ressources et Développement Durable

Mémoire d'atomes

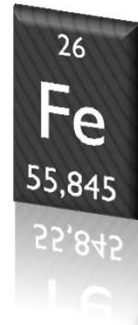
- Flux mondial de ressources



Ressources et Développement Durable

Mémoire d'atomes

- Flux mondial de ressources



Ressources et Développement Durable

Quels indicateurs ?

- Promouvoir les meilleures pratiques minières
 - Gestion de rejets; Monitoring environnemental;...
 - Réhabilitation; Biodiversité; ...
 - Responsabilité sociétale ;...
- Indicateurs qui reflètent l'impact environnemental
 - NORILSK (RUS) 1,5% Ni
 - ✓ Au-délà du cercle arctique
 - ✓ Broyage sous-terrain
 - ✓ Procédé Pyrométallurgique
 - ✓ Sulfures de Ni (SO₂)
 - ✓ Cu, Co, PGE coproduits



Ressources et Développement Durable

Quels indicateurs ?

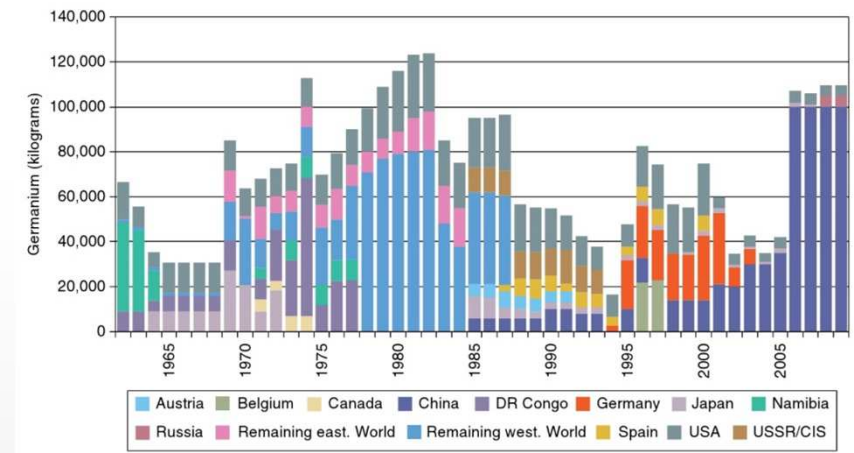
- Indicateurs qui reflètent l'impact environnemental
 - TIEBAGHI (N CAL) 1,5% Ni
 - ✓ Ecosystème Tropical (Récifs)
 - ✓ Ciel Ouvert (Occupation Sol)
 - ✓ Silicates Ni
 - ✓ Pressure Acid Leaching



Ressources et Développement Durable

Quels indicateurs ?

- Promouvoir des Circuits Plus Courts
- Promouvoir la co-production
 - Ressources en Germanium
 - CHINE
 - ✓ Ge dans les couches de charbon
 - ✓ Lixiviation des cendres de centrales électriques
 - EUROPE
 - ✓ Ge de lignite ou dépôts de zinc
 - ✓ Ressources méconnues
 - ✓ Pas d'incitants à l' extraction



World Production of Ge by country, Gunn, 2014

Ressources et Développement Durable

Conclusions

- Nécessité d'indicateurs spécifiques
 - Environnementaux
 - Sociétaux
- Difficulté de comparaison de sources
 - Exploitant des gisements différents
 - Utilisant des technologies différentes
 - ...

Ressources Minérales

Recyclage



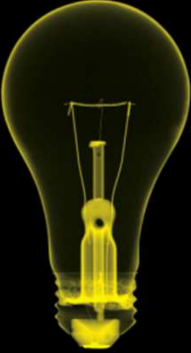



Ressources Minérales et Recyclage

Vers une Economie Circulaire



Ressources Minérales et Recyclage

Une histoire de lumens

| Incandescence | Halogène | Fluo-compacte | LED |
|---|--|---|---|
|  |  |  |  |
| 12-20 lm/W | 18-25 lm/W | 60-80 lm/W | 25-140 lm/W |
| Tungstène Verre,... | Tungstène Iode, Brome, ... Verre,... | Tungstène Mercure, Terres Rares, ... Verre, Plastiques, ... | Gallium Indium, Cérium, Yttrium, Cuivre, Argent, Silicium, ... Plastiques, ... |

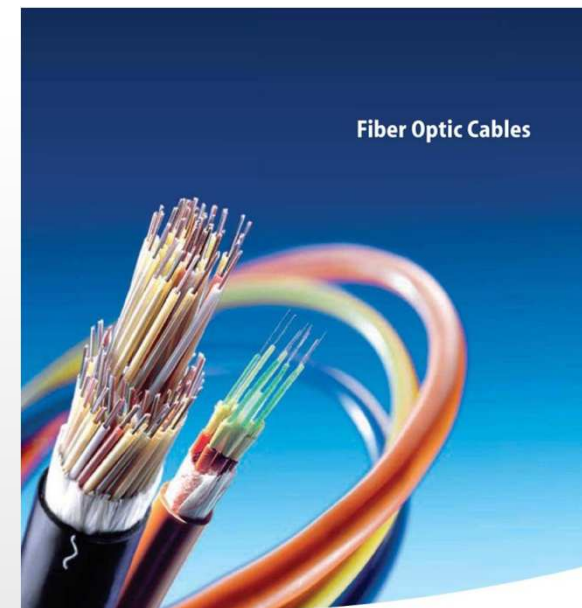
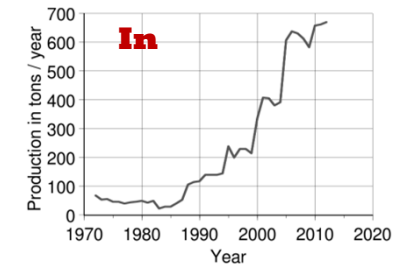
Les produits du futur ne seront pas seulement optimisés au regard de leur **fonctionnalité** mais également de leur **recyclabilité** et de la **disponibilité durable** des ressources qu'ils mobilisent

Ressources Minérales et Recyclage

Aider à boucler la boucle

- Mettre assez de matière dans la boucle
 - ✓ 4000 t de Ge dans le cycle
- Eviter les usages dispersifs
 - ✓ Ge comme catalyseur PET
- Collecter les produits en fin-de-vie
 - ✓ Ge des fibres optiques (14mg/km)
- Optimiser les mines urbaines
 - ✓ Coût de recyclage < coût minage

$$Z_{\text{cut-off}} (\text{mine}) > Z_{\text{cut-off}} (\text{recycle})$$



Ressources Minérales et Recyclage

Aider à boucler la boucle

- Optimiser les Mines du Futur
 - 1. Concentrations Métalliques
 - Maintenir les teneurs au-dessus d'un cut-off technologique
 - ✓ Seuls les métaux précieux (Au, PGM) payent actuellement le recyclage
 - 2. Spéciation métallique
 - Métal, alliage, sel, composé organique, ...
 - ✓ Grande diversité d'alliages Ni, Al
 - 3. Paragenèse métallique
 - Assemblages métalliques inattendus, ..., contaminations
 - ✓ Fils de cuivre à dépôt de surface en aluminium
 - 4. Assemblage textural
 - Libération et démantèlement
 - ✓ Séparer le cœur de la gaine des fibres optiques
 - 5. Volume de la mine
 - S'assurer que des quantités suffisamment volumineuses pourront être collectées
 - 6. Homogénéité
 - Zonation, Mélange
 - ✓ Le gisement évolue au cours du temps (changements technologiques)

CRESus Centre for Resource Efficiency & Sustainability

- *Plateforme polyvalente* de traitement des matières polymétalliques
- *Guidance* dans la conception de produits et le développement de procédés
- *Certification* d'indices de recyclabilité



Projet Mobilisateur
REGION WALLONNE

Reverse Metallurgy
60 M€

