



# Ressources Métalliques & Environnement

Eric PIRARD

*HELMo – Liège – 15032022*

---

# Choix Technologiques

*Choix de Société?*

# Technologie et Société

---

- Ni ingénieur...
- Ni géologue...



Georges-Louis LECLERC (1707-1788)

# Progrès Technologique

- ... sous contrainte écologique



Haut-fourneau dans la région de Spa(1612) Jan Brueghel

« Bientôt on sera forcé de s'attacher à la recherche de ces anciennes forêts enfouies dans la terre, et qui, sous une forme de matière minérale, ont retenu tous les principes de la combustibilité des végétaux, et peuvent les suppléer pour l'entretien des fours et fourneaux ... pourvu qu'on donne à ce charbon minéral les préparations convenables »

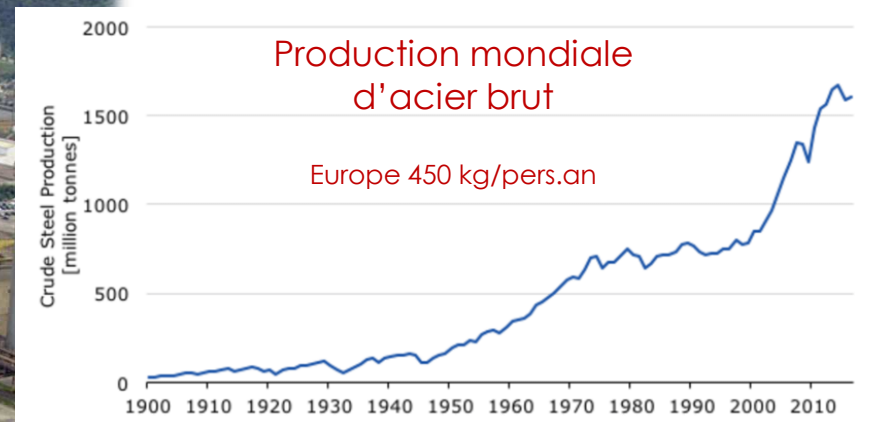
Buffon, 1783, *Histoire des minéraux*, p 417

# Progrès Technologique

- ... sous contrainte écologique



Haut-Fourneau HFB d'Ougrée



1,9 tonnes CO<sub>2</sub> par tonne acier

5% des émissions mondiales de GES

# Progrès Technologique ?

---

- ... sous contrainte économique
  - Economie de fabrication - Economie d'usage

*Incandescent*



12-20 lm/W

*Halogene*



18-25 lm/W

*Fluo-compact*



60-80 lm/W

*LED*



25-140 lm/W

# Progrès Technologique ?

---

- Puissance

Locomotive Cockerill T 12 (1939)



# Progrès Technologique ?

---

- Démocratisation





# Progrès Technologique ?

---

- Confort/Sécurité



1960

2010

# Fuite en avant Technologique ?

- Croissance, croissance,...
  - Génération BIC



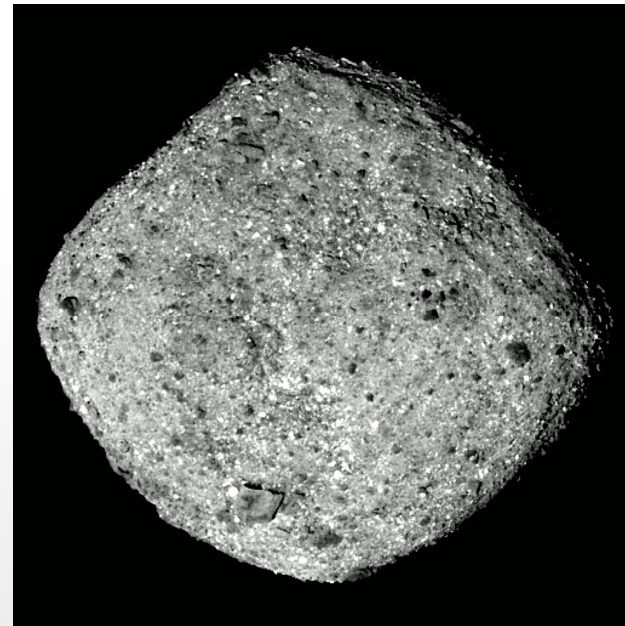
Consommation mondiale d'aluminium 1900-2018



# Fuite en avant Technologique ?

---

- Plus Ultra



20 Oct 2020 : Prélèvement de régolithe sur l'asteroïde Bennu (150 millions de km).



Sans limites?



# NOTRE AVENIR À TOUS



La Commission mondiale des Nations unies  
pour l'environnement et le développement

Introduction de Gro Harlem Brundtland

Éditions LAMBDA

Alternatives



Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre celui des générations futures.

Deux concepts sont inhérents à cette notion : le concept de « besoins », et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité, et l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir.

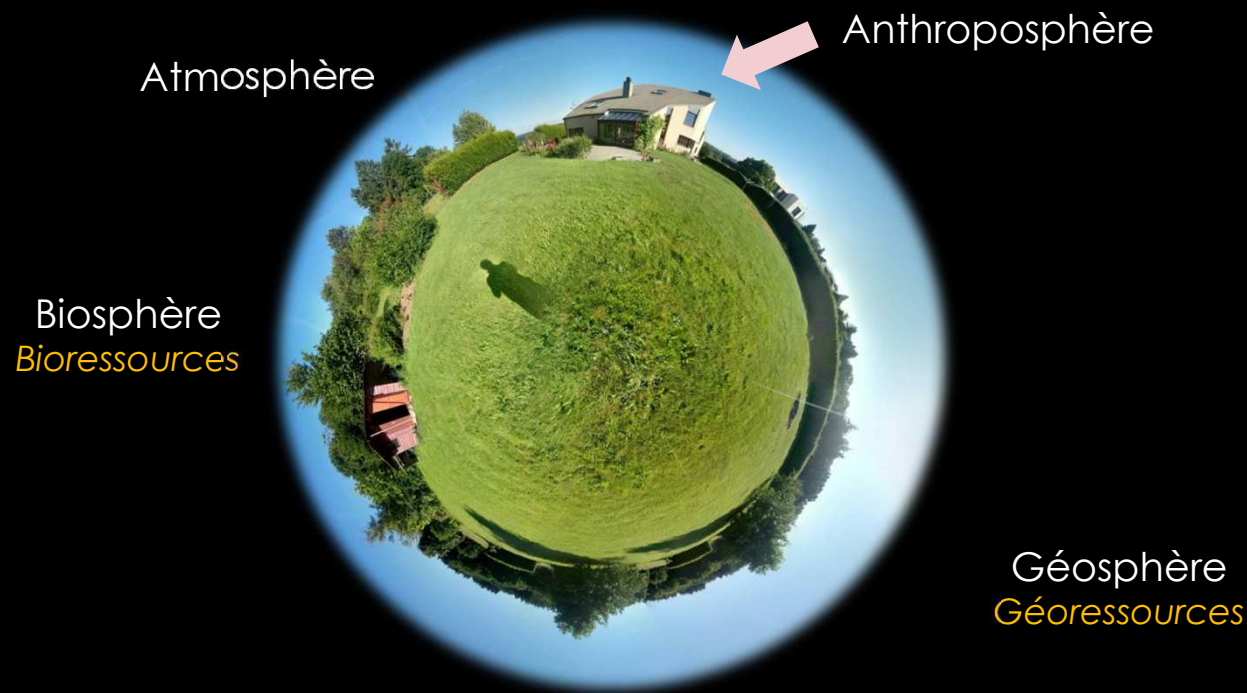
---

# Les Géorressources

*If you can't grow it,  
you'll have to dig it!*

# Économie Sphérique

- Art d'administrer un bien (*une planète!*) par une gestion prudente et sage afin d'obtenir (*pour tous et pour les générations futures*) le meilleur rendement en utilisant les moindres ressources



If you can't grow it...  
you'll have to dig it!

# Le monde des géoressources



- Ressources énergétiques
  - Pétrole, Gaz, Charbon, Lignite,...
  - Uranium
- Ressources en eau
  - Souterraine
  - Surface
- Minéraux Industriels
  - Sables, agrégats, argiles, ...
  - Carbonates, phosphates, ...
  - Chlorures, sulfates, borates, ...
  - Kaolin, talc, diatomée,...
  - Gemmes
- Ressources Métalliques
  - Métaux de base (\$/kg)
  - Métaux précieux (\$/g)
  - Métaux critiques?



# Le monde des géoressources

- Un jardin de 1000 m<sup>2</sup> sur 1m profondeur
  - 2000 tonnes de schiste
  - Tous les métaux y sont en proportions variables
    - réf. European Paleozoic Shale Composite



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 tous mes besoins... mais à prix d'or !

# Le monde des géoressources

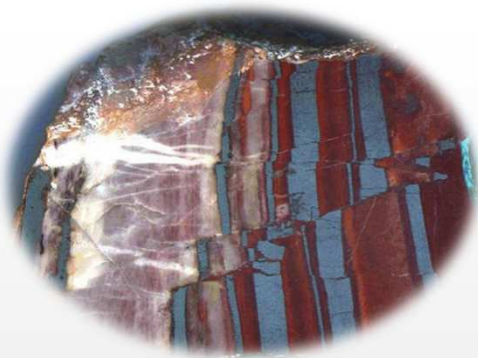
---

- **Roche**

- Matériau composite naturel formé d'un agrégat de minéraux.

- **Minerai**

- Substance solide formée dans l'environnement "naturel", et permettant aux conditions actuelles une valorisation industrielle économiquement acceptable.



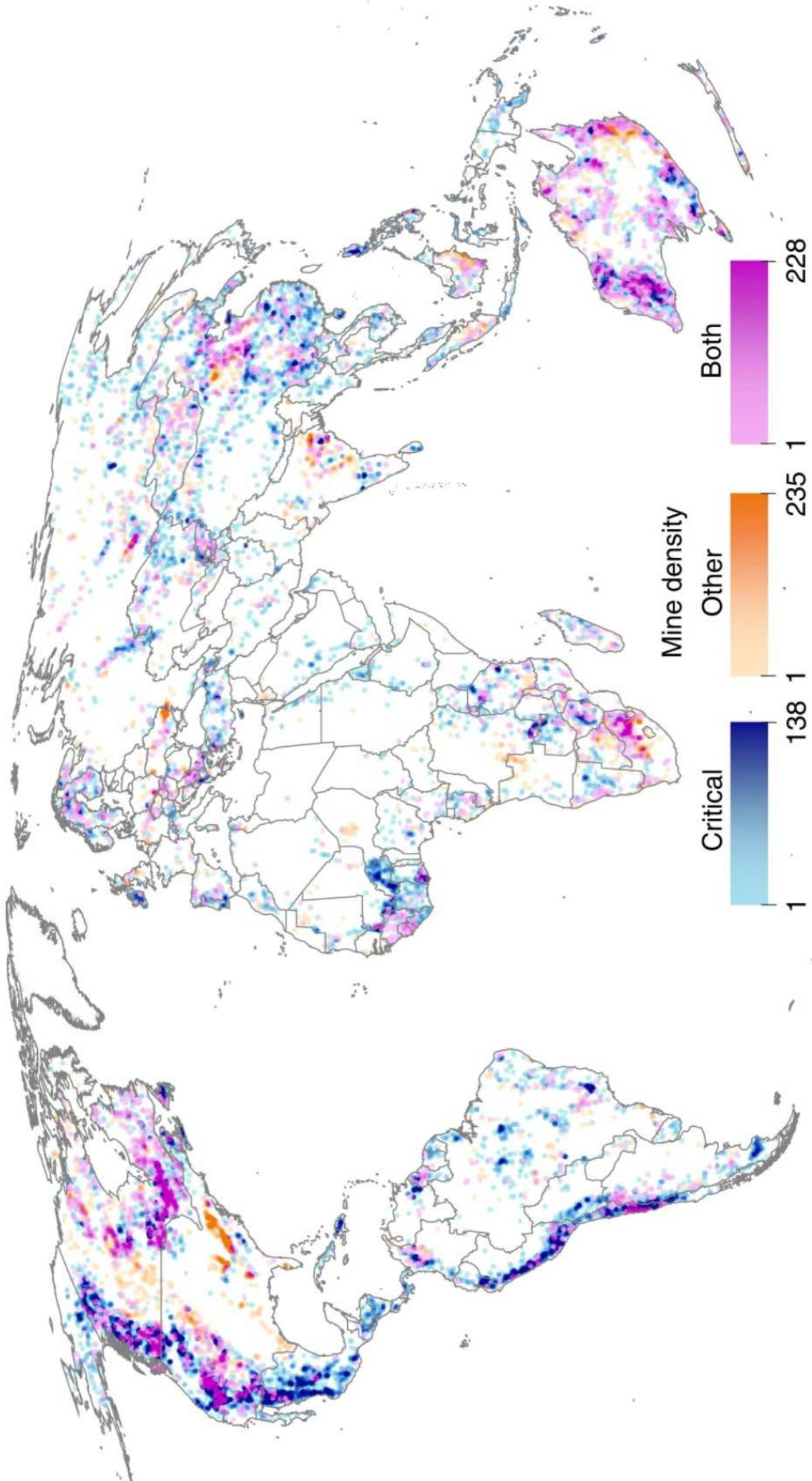
Minerai de fer (60 % Fe)



Minerai de cuivre (0,4% Cu)

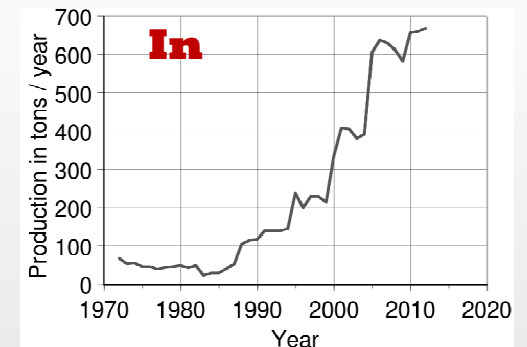
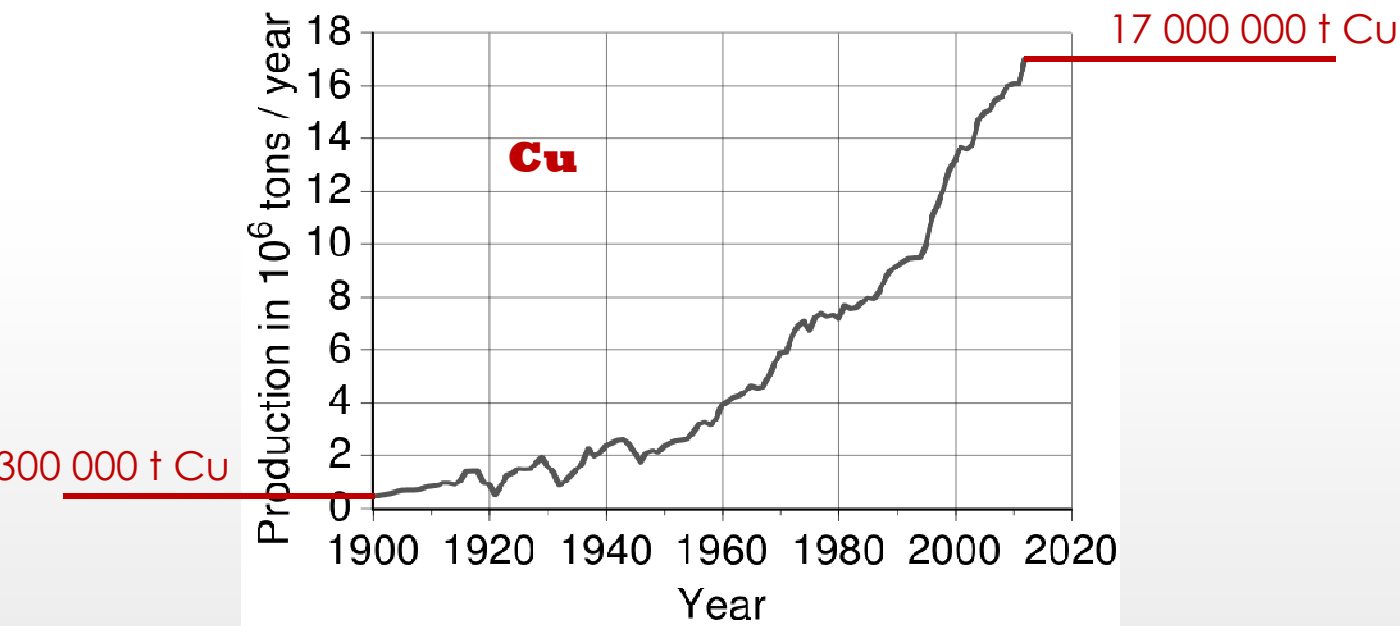


Minerai d'or (1 g/t Au)



# Un siècle d'extractivisme!

- Croissance exponentielle de la production de tous les métaux
  - **#EuropeanWayofLife** = 5 tonnes de minerai de cuivre / par personne.an



Consommation mondiale de cuivre 1900-2016

# Un défi économique



- Exploitation du fer en Australie
  - Gigantisme et Automation
  - Véhicules autonomes
  - Mine robotisée



1 500 km de distance!



Centre de Commande  
Rio Tinto à Perth (AUS)



Opérations minières dans le Pilbara (AUS)



Véhicules télécommandés  
de 300 tonnes

# Un défi environnemental



- Exploitation du Nickel en Nouvelle-Calédonie
  - Inventaire faune/flore
  - Gestion des rejets, effluents
  - Remédiation
  - Analyse du cycle de vie



TIEBAGHI (N CAL) 1,5% Ni

*Silicates de Ni  
Ecosystème tropical (récifs)  
Mine à ciel ouvert  
Lixiviation acide sous pression*

# Un défi social



- Les défis du développement durable et de la responsabilité sociétale
  - Artisanat = 20% de la production congolaise mais > 90% des « mineurs »



Mine de Mutanda (DRC)  
20 000 t Co/an - 1800 employés

275 000 t/jr



Mines artisanales (DRC)  
5 000 t Co/an - 150 000? creuseurs

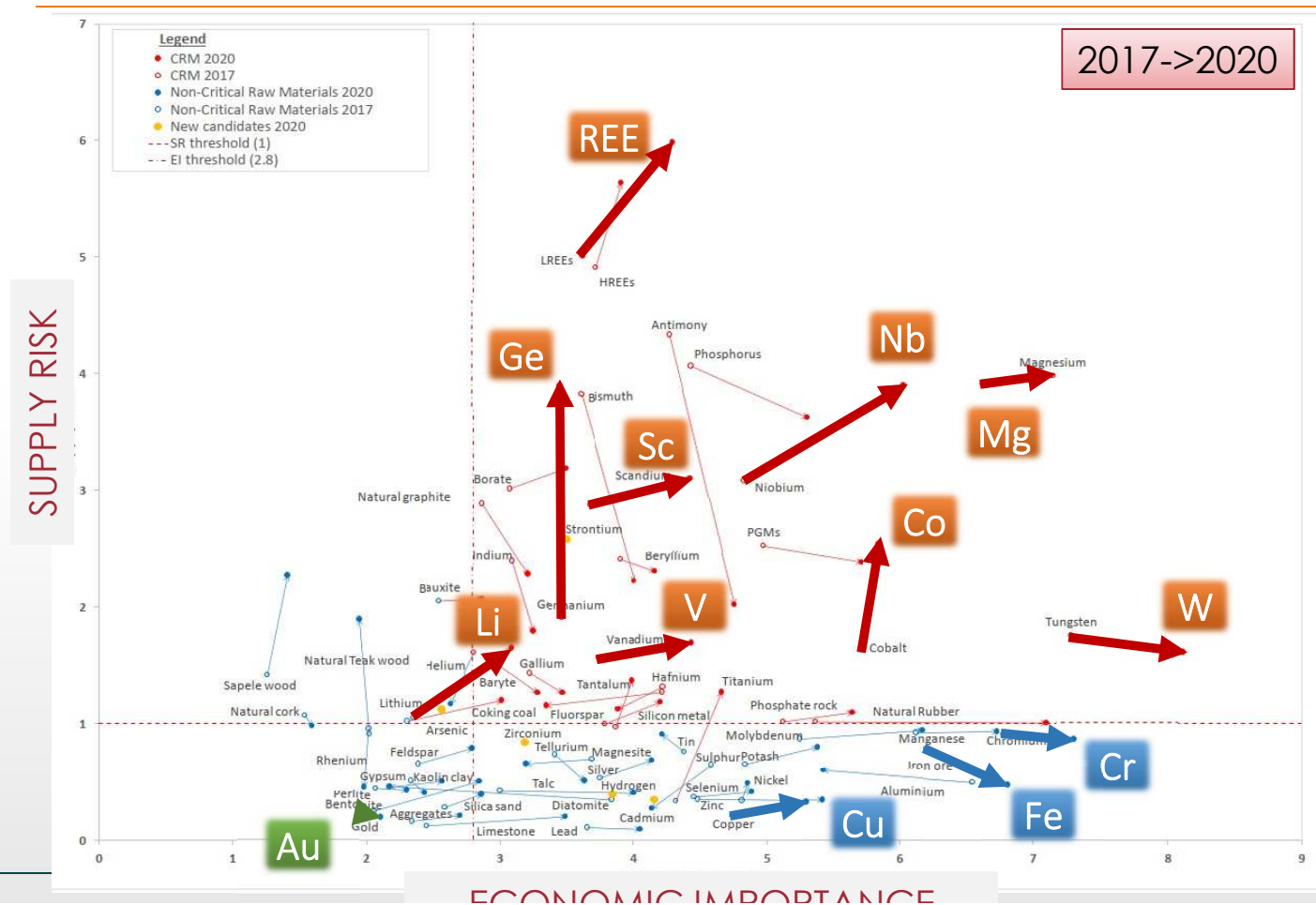
---

Pourquoi certaines matières premières  
seraient-elles devenues **critiques** ?  
*Trois dimensions...*



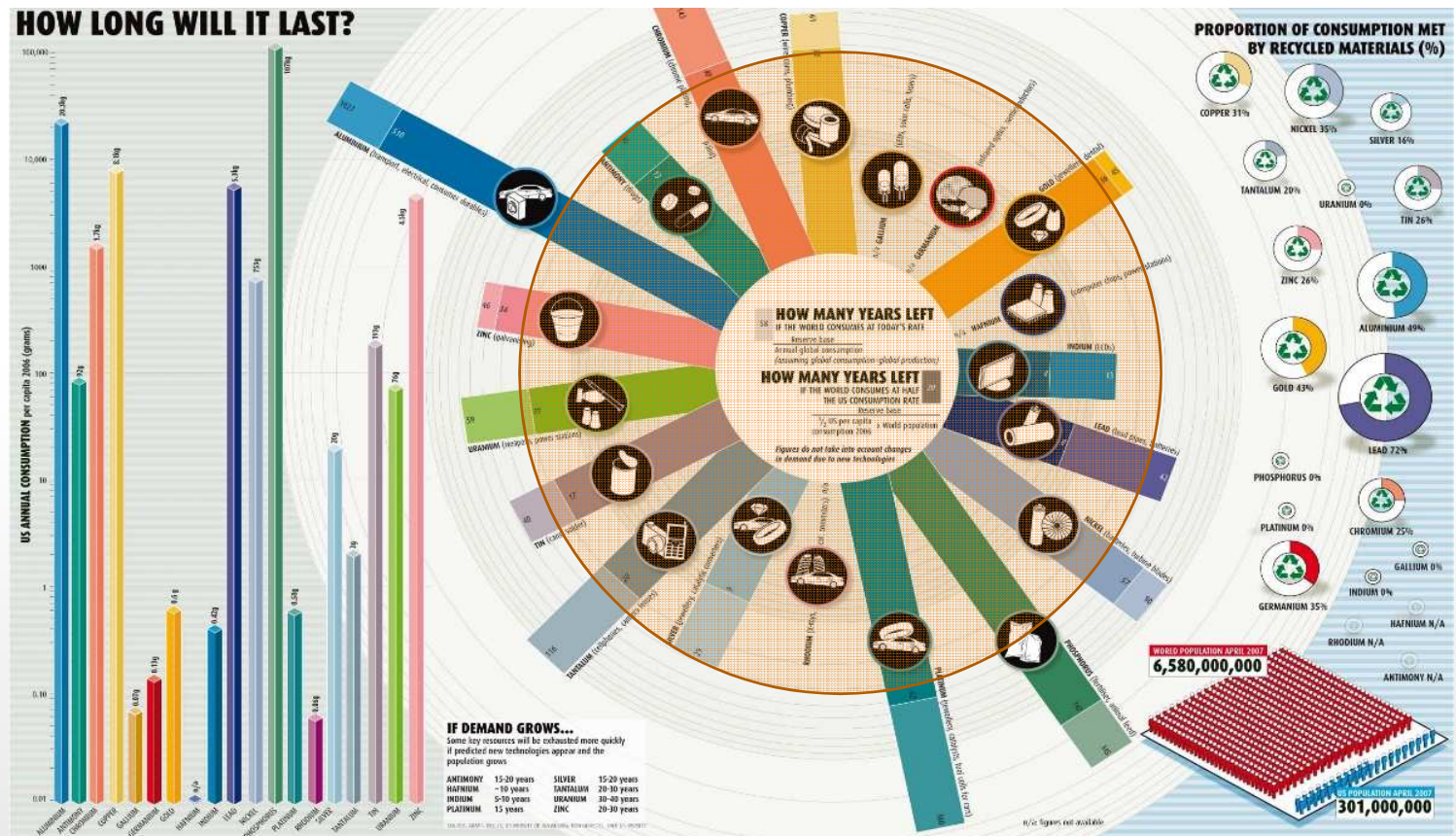
# Critical Raw Materials for the EU

- Trois dimensions
  - Géologique
  - Géopolitique
  - Technologique



# 1. La dimension Géologique (Ressources & Réserves)

- STOP FAKE NEWS !
  - Alarmisme inutile



A. Reller & T. Graedel, 2007

# 1. La dimension Géologique (Ressources & Réserves)

- Vision statique: "Il y a vingt ans qu'il n'y en a plus que pour vingt ans!"
  - Réserves (ex. <http://minerals.usgs.gov/>) vs. Taux de Production



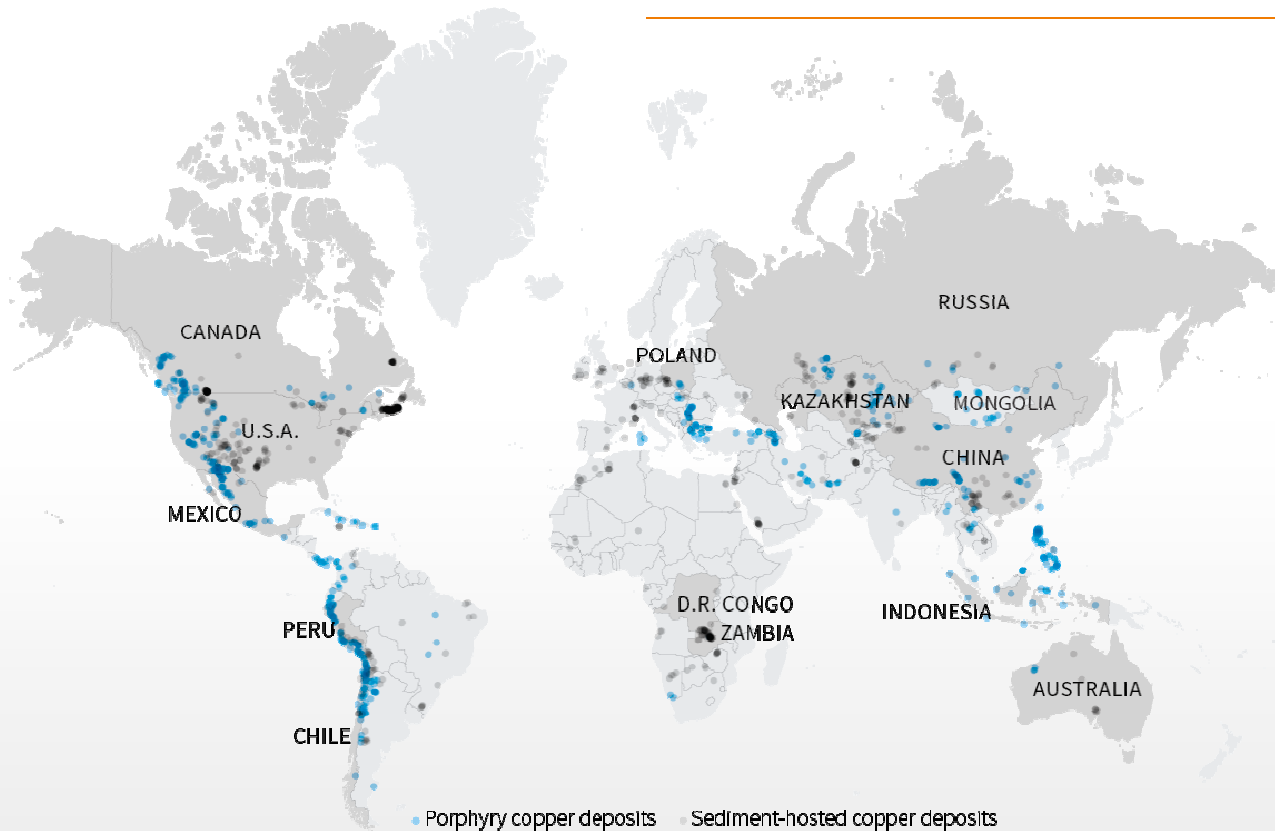
Commodity	Reserves 1999	Annual Production 2000	Lifetime +5% Scenario
Zinc	190 Mt	7,75 Mt	16 ans
Aluminium	25 Gt	123 Mt	48 ans
Indium	?? t	200 t	?? ans
Nickel	46 Mt	1,1 Mt	22 a
Tin	8 Mt	207 kt	21 a

## ZINC en 2016

200 Mt (réserves mondiales)  
13,4 Mt (production mondiale annuelle)

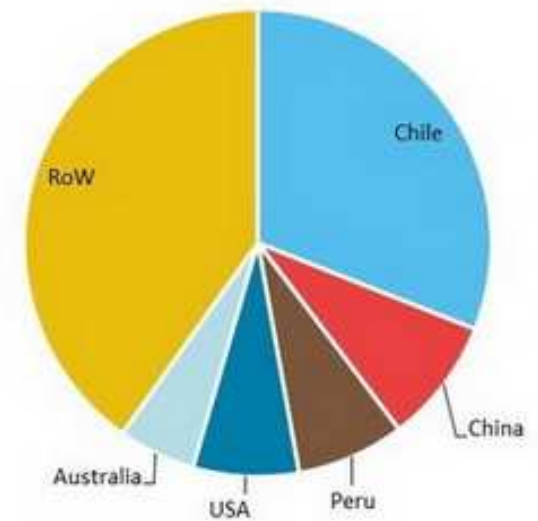
After « **Breaking New Ground** »  
Report of the Mining, Minerals & Sustainable Development Project  
Int. Institute for Environment and Development (IIED), 2002

## 2. La dimension Géopolitique (Stratégique)

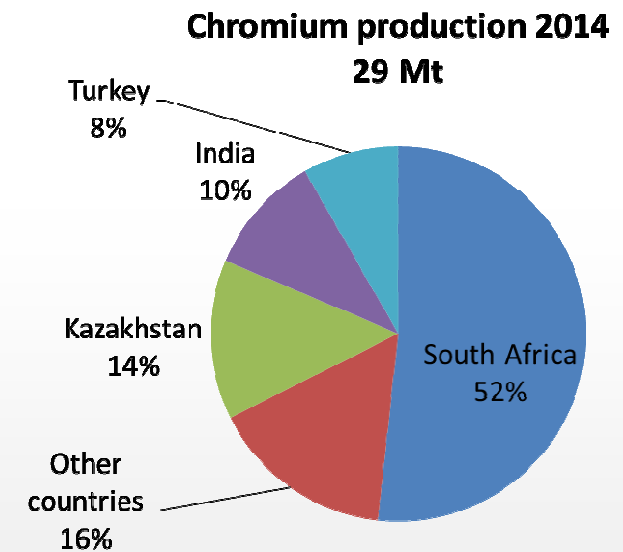
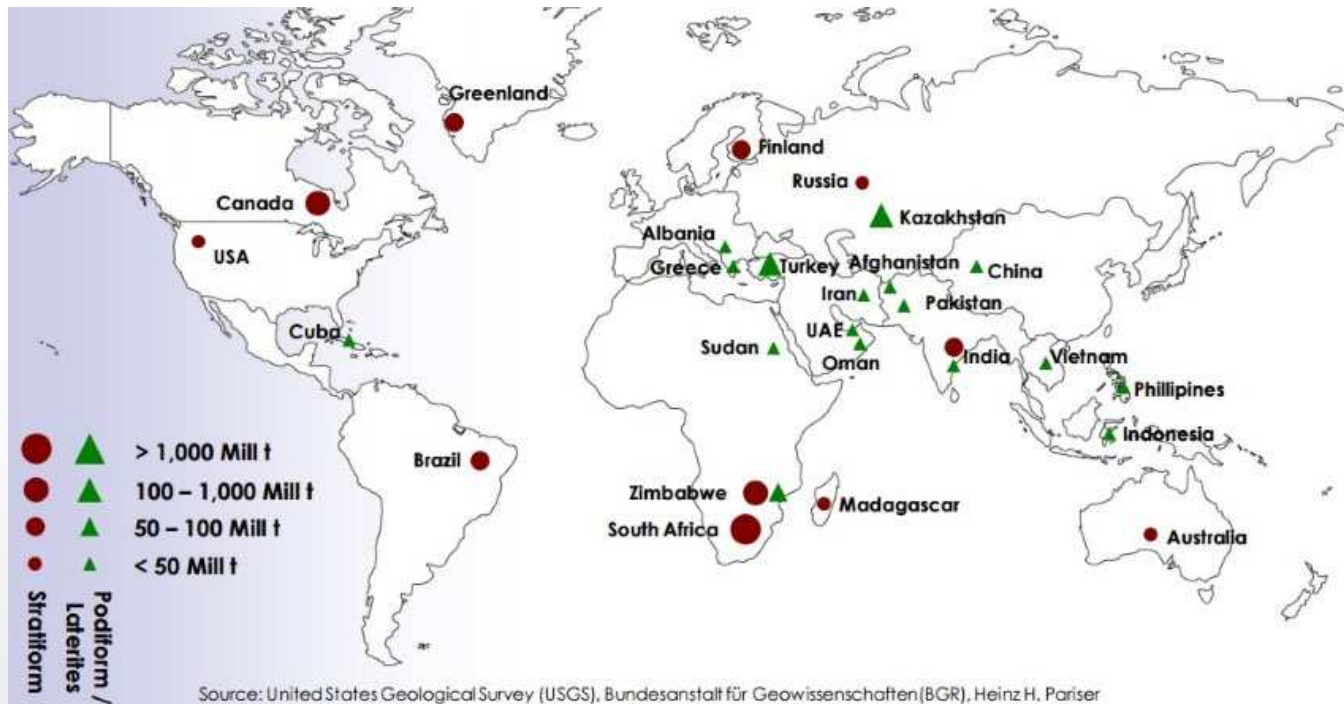


Répartition mondiale des principaux gisements de cuivre

World Mine Production of Copper

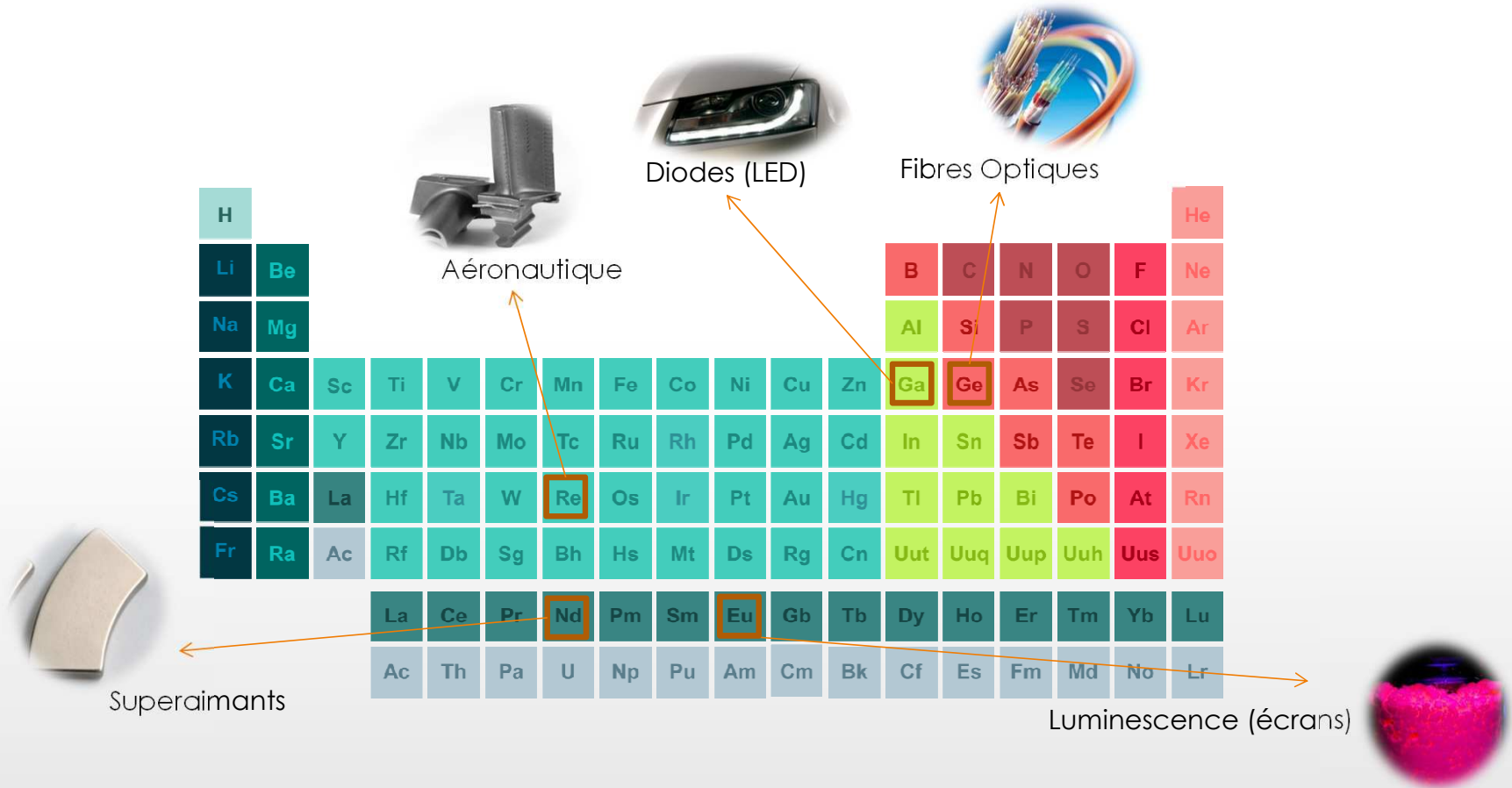


## 2. La dimension Géopolitique (Stratégique)



Répartition mondiale des principaux gisements de chrome

# 3. La dimension Technologique (Critique)



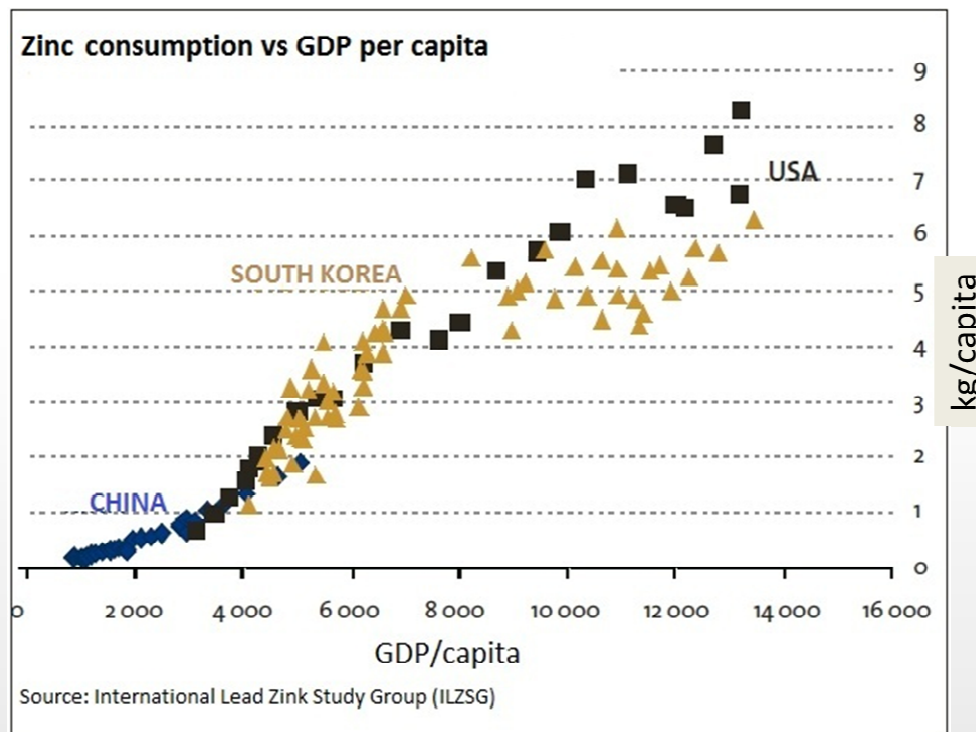
---

# Green Deal

*... vers une croissance dématérialisée*

# Dématérialisation ?

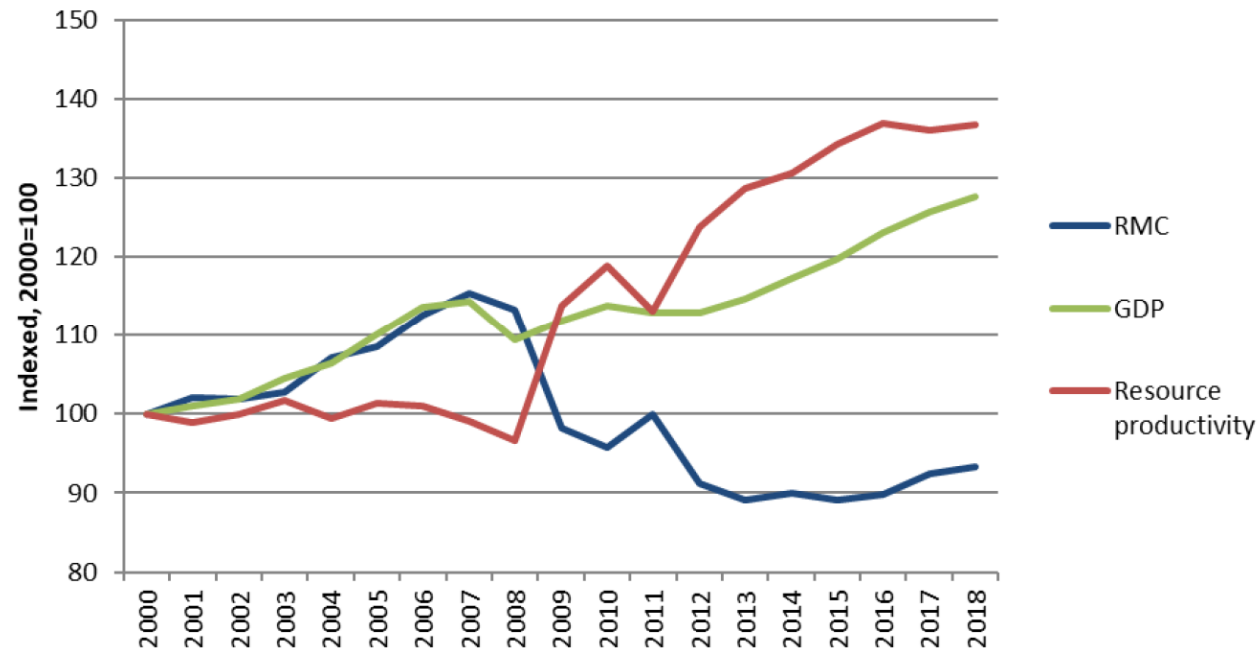
- Il faut découpler croissance et ressources





# Dématérialisation ?

- Il faut découpler croissance et ressources = **Greenwashing**



<http://www.materialflows.net/decoupling-material-use-and-economic-performance/>

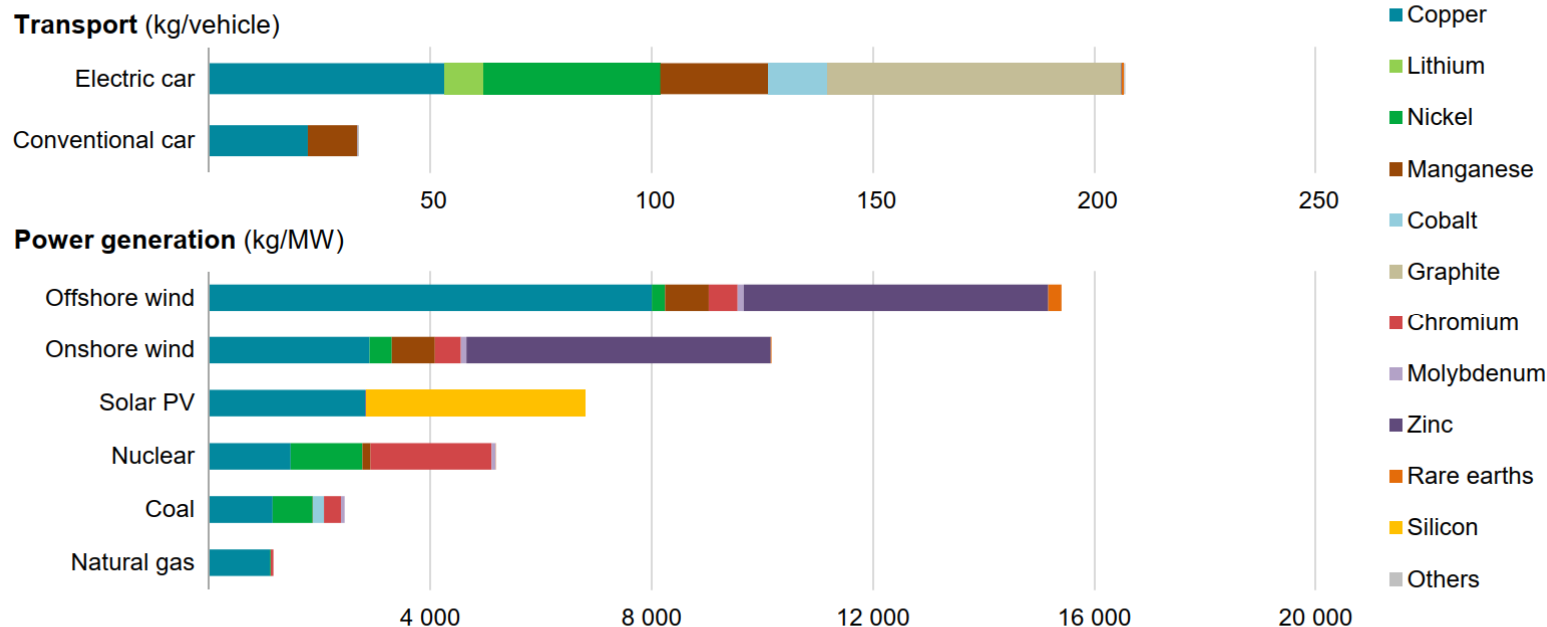
# Dématérialisation ?

- Des besoins énormes pour la transition énergétique...

The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions



Minerals used in selected clean energy technologies

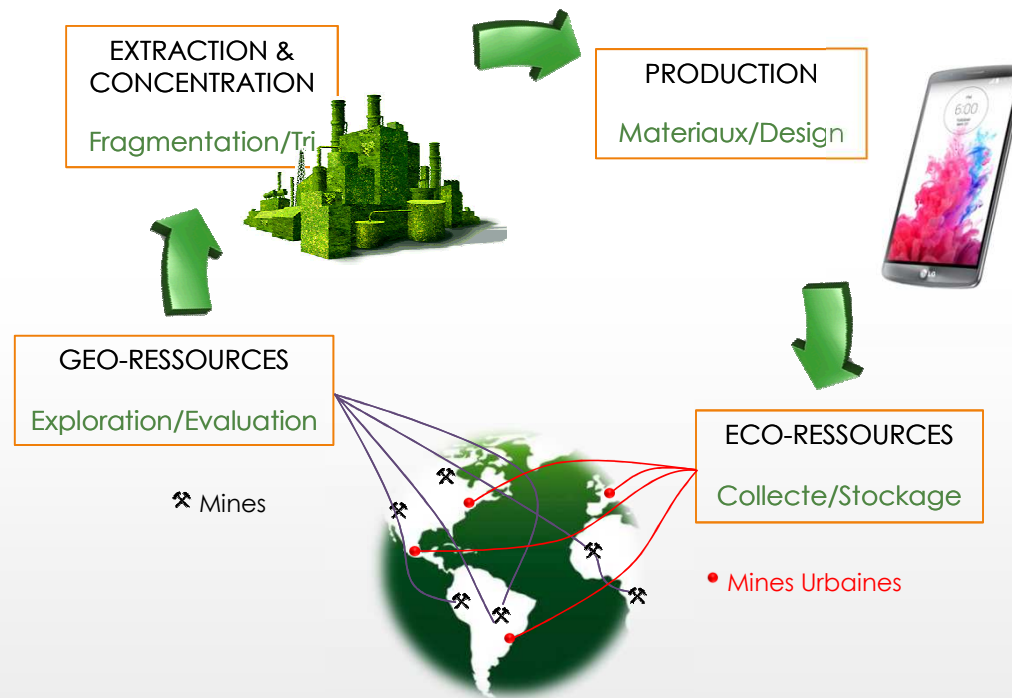


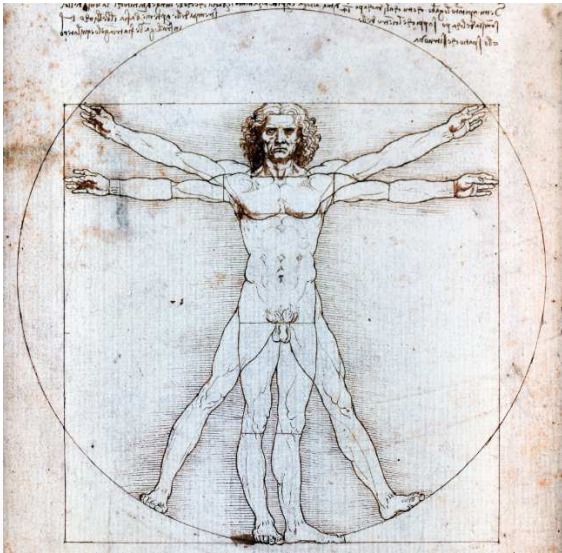
# Génération BIC

- Des déchets qui s'accumulent
  - Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE) : 10 kg/pers.an
  - Batteries :  $\approx$  1kg/pers.an
  - Véhicules Hors d'Usage (ELV)  $\approx$  15 kg/pers.an
  - PMC (Plastique – Métal – Carton)  $\approx$  16 kg/pers.an



# Penser en cycle





---

# La quadrature du cercle

*Penser une économie plus circulaire*

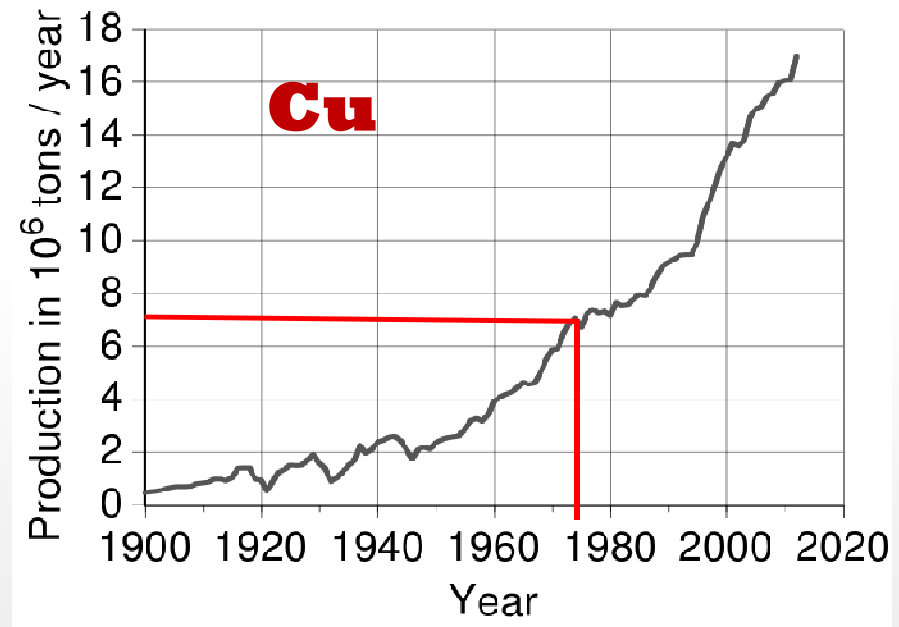
# Penser le cycle

- Les quatre défis de l'économie circulaire



# Défi 1 : FEED the loop

- Le recyclage, même parfait est insuffisant pour nos besoins



## Défi 2 : DESIGN the loop

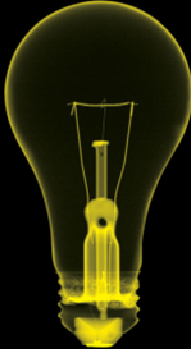



---

- Repenser notre design
  - Design for recycling
  - Eviter les matériaux composites non indispensables





## Défi 2 : DESIGN the loop

<i>Incandescent</i>	<i>Halogene</i>	<i>Fluo-compact</i>	<i>LED</i>
			
<i>12-20 lm/W</i>	<i>18-25 lm/W</i>	<i>60-80 lm/W</i>	<i>25-140 lm/W</i>
Tungsten Glass,...	Tungsten Iodine, Bromine, ... Glass,...	Tungsten Mercury, Rare Earths, ... Glass, Plastics,...	Gallium Indium, Cerium, Yttrium, Copper, Silver, Silicium, ... Plastics, ...

Les produits ont été optimisés pour leur *fonctionnalité*. Il faut désormais se soucier de leur *recyclabilité* et de la *disponibilité* durable des ressources.

# Défi 3 : SLOW DOWN the loop

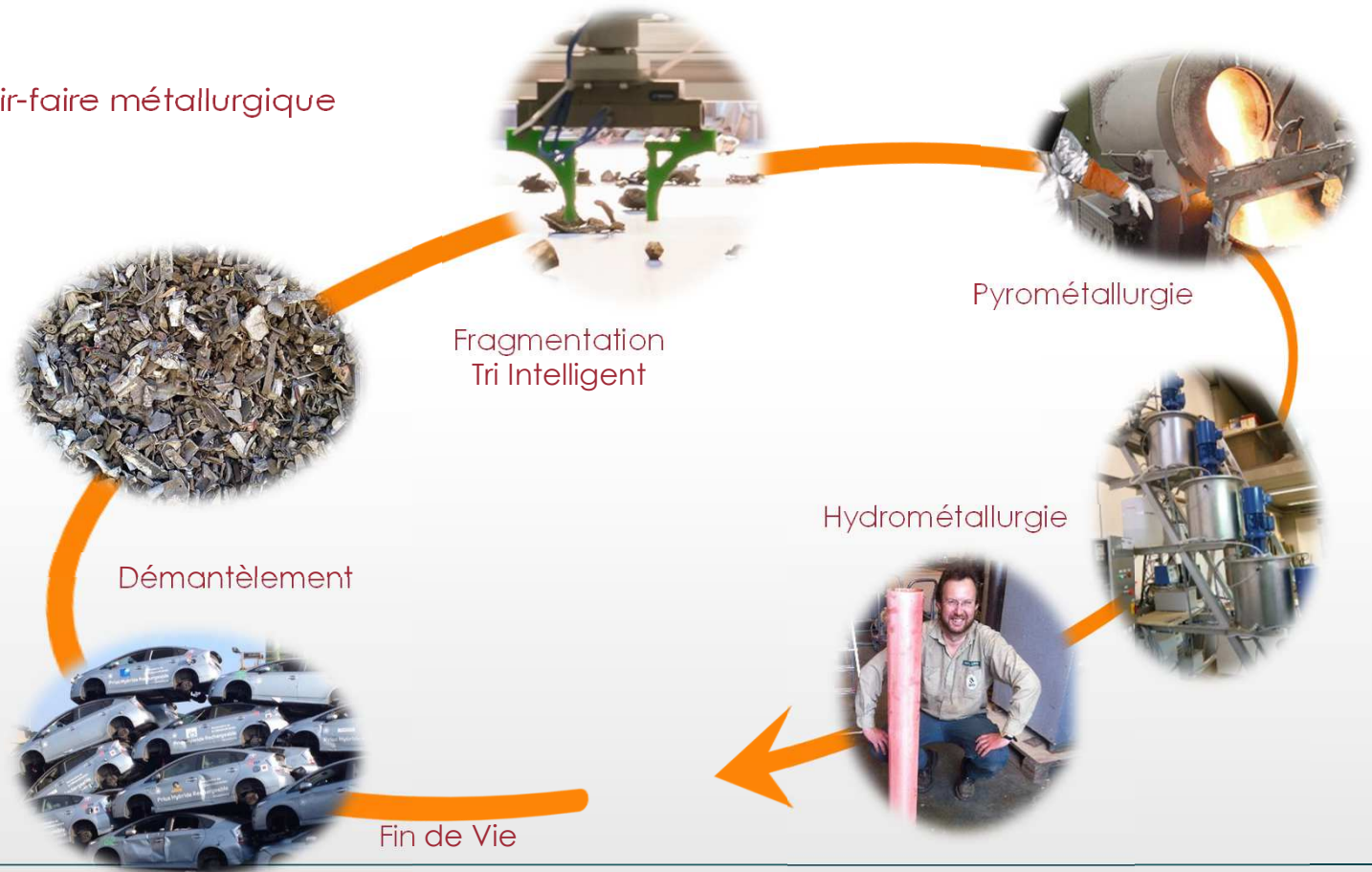
---

- Maîtriser notre fringale technologique
  - Education du consommateur
  - Nouveaux « modèles d'affaires »
    - Economie de la fonctionnalité / Economie du partage



# Défi 4 : CLOSE the loop

- La Mine Urbaine
  - Remobilisation du savoir-faire métallurgique



## Défi 3 : SLOW DOWN the loop

Même avec un taux de **récupération** de 95%  
on **dissipe** la moitié de la matière après 14 générations !



---

# Anthropie

... ou Entropie?

# Anthropie ou Entropie?

---



Ce qui est **critique** ce n'est pas tant la matière première  
que l'**utilisation** que nous en faisons!

---

M E R C I

---

# Récupérer les métaux

*Véhicules Hors d'Usage (VHU)*



# Récupérer les métaux des VHU

- La mine urbaine
  - Un gisement polymétallique: Teneur? – Tonnage ? – Spéciation ?
- Pré-Traitement

Ferreux



Plastiques



Ultimes



COLLECTE



BROYAGE

Non-Ferreux Polymétalliques



TRAITEMENT PHYSIQUE

densité-conductivité-...

# Récupérer **plus** de métaux

- Les défis



Grande gamme d'alliages  
Valeurs variables



*Tri Intelligent  
Multicapteurs*



Ubiquiste  
Enchassé dans les déchets électroniques



*Hydrométallurgie*



Très spécifique  
Superaimants

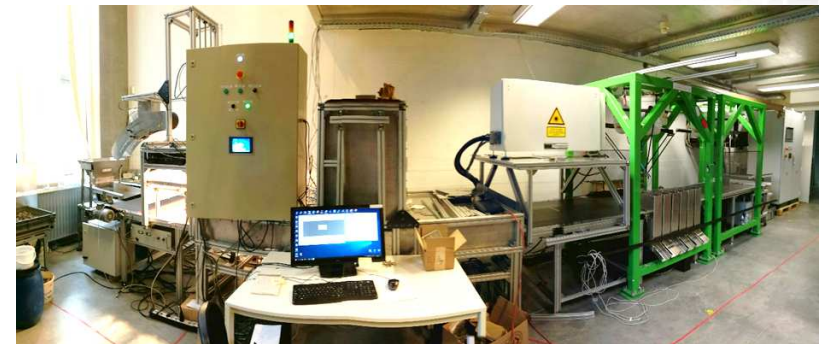


*Démantèlement  
Hydrométallurgie*

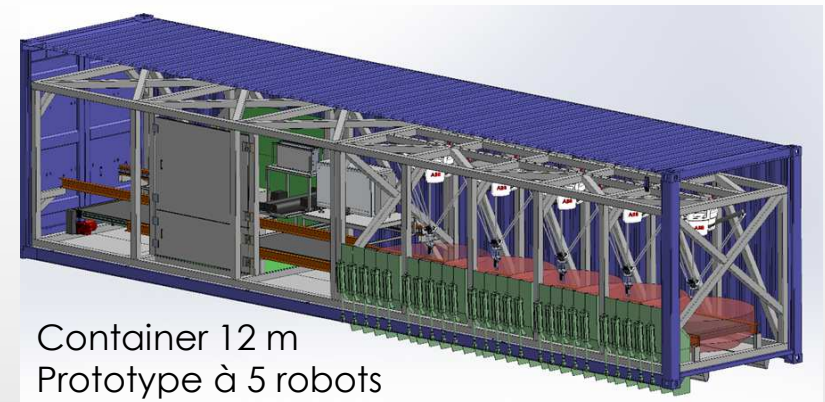
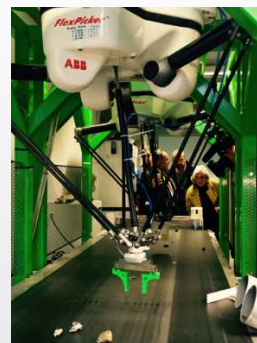
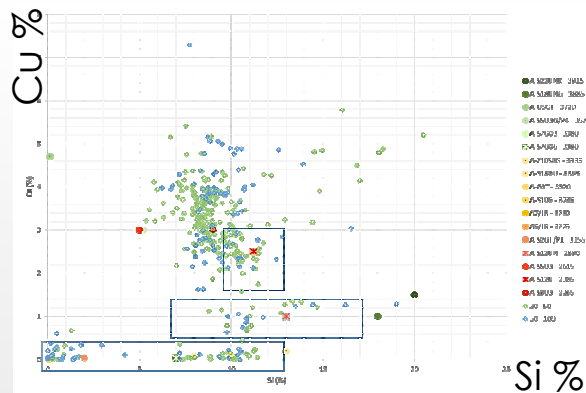
# Tri Intelligent des Alliages-AI



- Identification en temps réel des scraps (20 pc/s)
  - Multiples **senseurs** (3D, VNIR, XRT, LIBS,...)
  - Algorithmes de **deep learning**
- Recyclage fonctionnel (6 t/h)
  - Regroupement d'alliages spécifiques en **classes multiples**
  - **Robots** Delta



Développement d'un banc de prototypage



Container 12 m  
Prototype à 5 robots

# Métallurgie Extractive du Cuivre



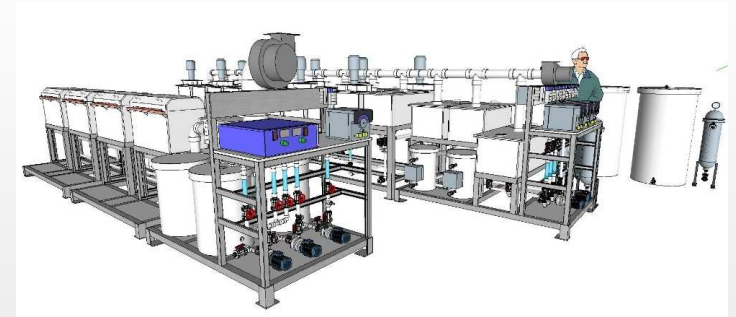
- Récupération du cuivre par dissolution des phases cuprifères complexes



Installation pilote d'hydrométallurgie @ULiege

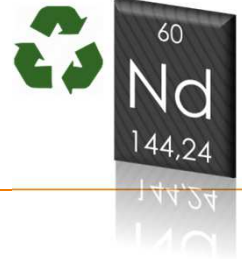


Lixiviation, extraction par solvants et électrolyse pour obtenir un Cuivre cathodique à 99,98%. @ULiege



Modèle 3D de l'unité d'extraction par solvants

# Récupération Sélective des Terres Rares



- Démantèlement manuel des superaimants
  - 1,2 kg de REE dans les segments de rotor du moteur électrique



Démantèlement manuel et récupération des aimants NdFeB après démagnétisation thermique



- Métallurgie extractive du Nd
  - 4 étapes à basse T° (< 80°)
  - 95 % récupération
  - Mix REO & coproduit Fe-Co

