



Ressources Métalliques & Environnement

Eric PIRARD

EcoConseil – **07072022**

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 »

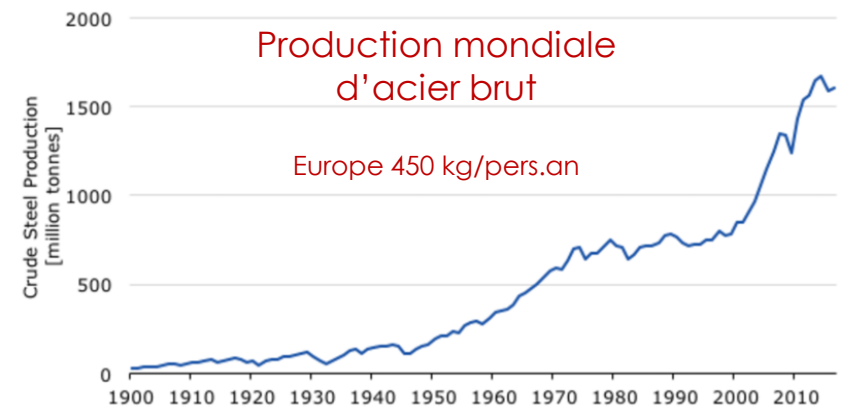
Buffon, 1783, *Histoire des minéraux*, p 417

Progrès Technologique

- ... sous contrainte écologique



Haut-Fourneau HFB d'Ougrée



1,9 tonnes CO₂ 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

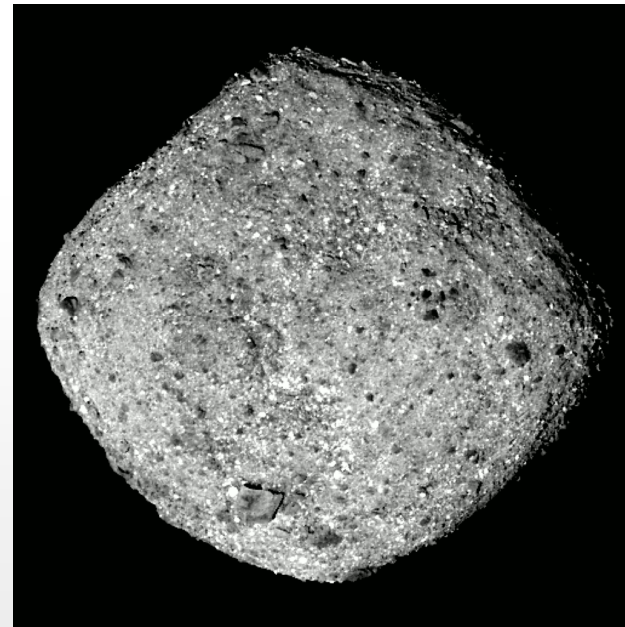


Consommation mondiale d'aluminium 1900-2018



Fuite en avant Technologique ?

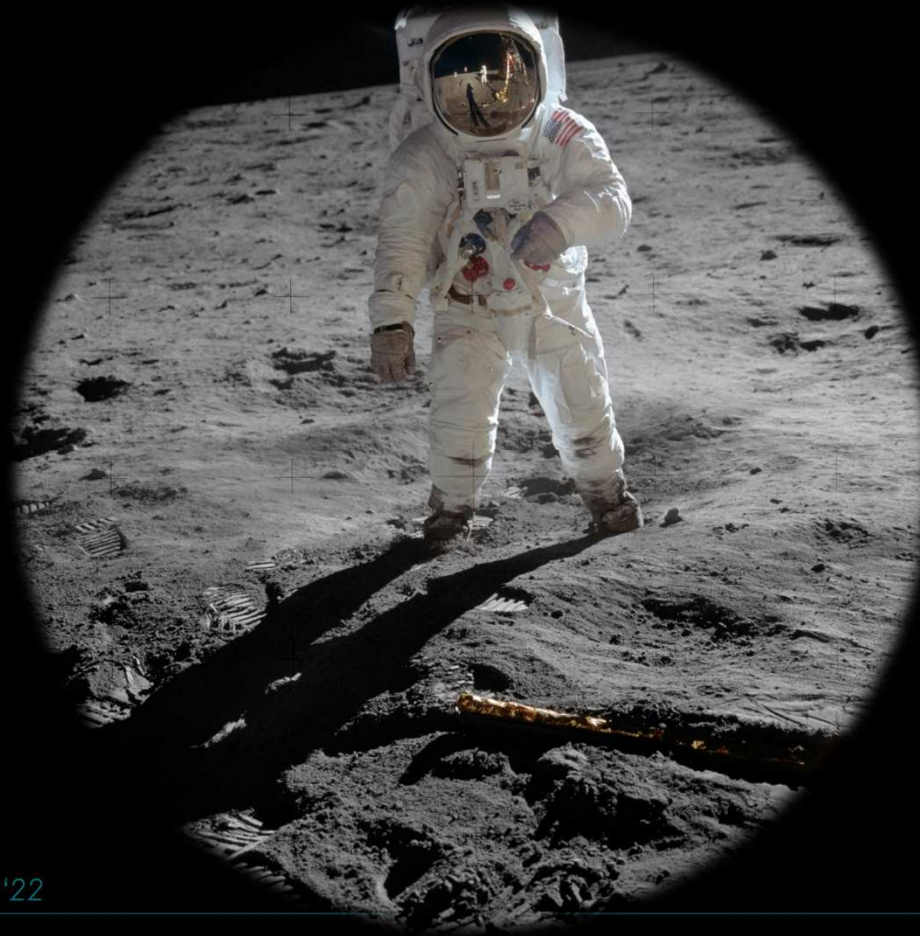
- Plus Ultra



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.

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

Atmosphère

Biosphère
Bioressources



Géosphère
Géoressources

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

L'économie circulaire n'existe pas...
Pas encore!

Anthroposphère et Mine Urbaine

- ... stock de matières
 - 180 t Mat. bâtiments /pers
 - 160 t Mat. infrastructures/pers
 - 10 t acier / pers
 - 424 kg aluminium / pers
 - 220 kg cuivre / pers
 - etc...



Sources:

Lanau et al., 2019, *Env. Sc. & Tech*, 53(15)

Graedel et al., 2010, *Metal Stocks in Society*, UNEP-IRP

Prof. Eric PIRARD – Jul '22

Economie Circulaire

- Cela n'existe pas!
 - Paradigme stimulant pour penser le cycle
- Déchets à toutes les étapes
 - ✓ Fabrication
 - ✓ Usage
 - ✓ Collecte
 - ✓ Recyclage
 - ✓ ...

~~Zéro Emissions~~

~~Zéro Déchets~~

~~100 % Recyclable~~

~~Dématérialisation~~



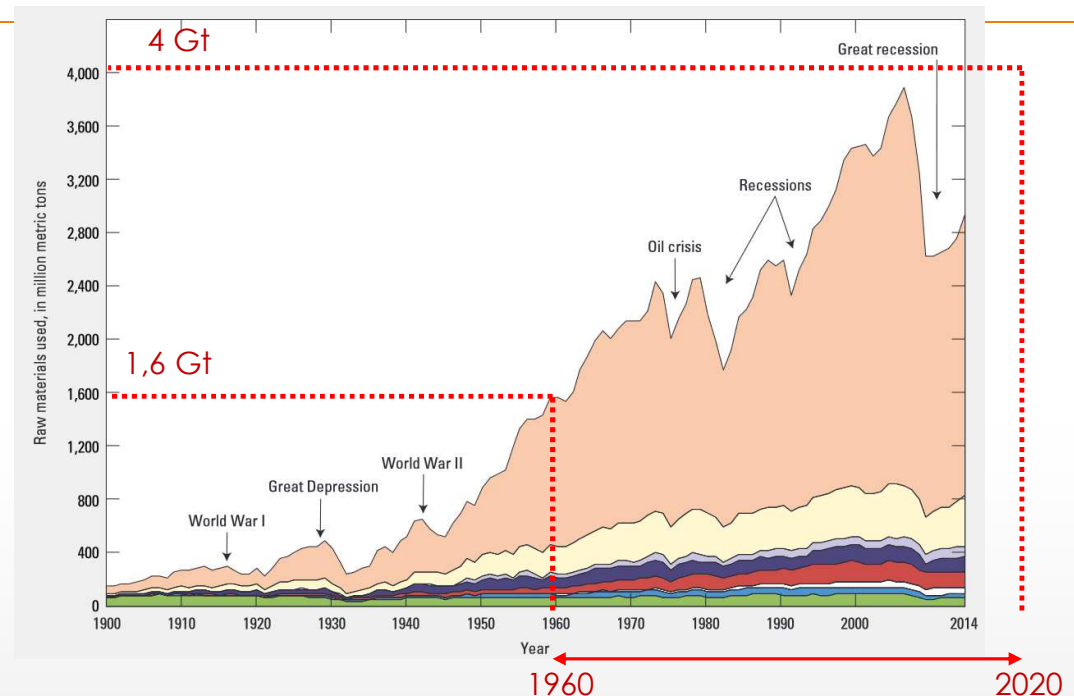
Source:
P. Huovila, Buildings as Materials Banks (BAMB – H2020)

Economie Circulaire



Extractivistas ?

- Besoins nouveaux
 - Ex. Li, Graphite, ...
- Croissance des besoins
 - Ex. Durée de vie 60 ans...
- Non recyclabilité des produits
 - Ex. argiles->briques



Le recyclage parfait (!?) pourrait au mieux contribuer à ± 30% des besoins d'un monde en croissance

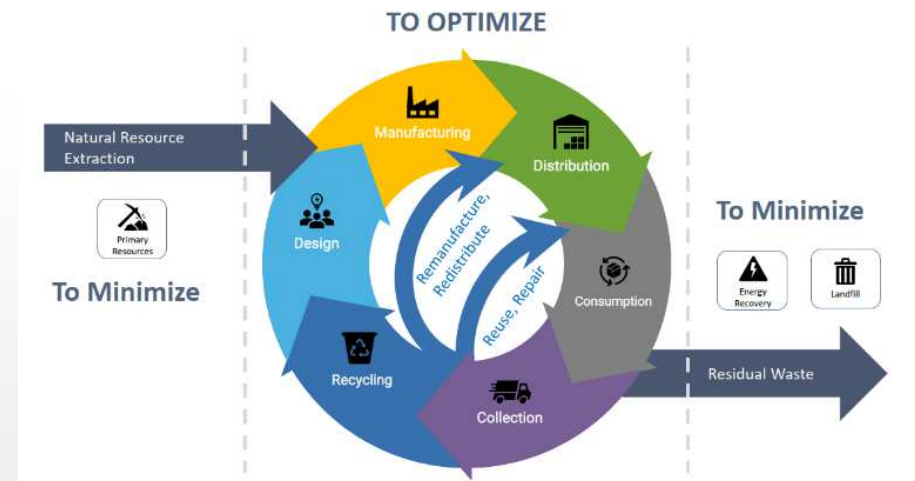
Quelle place pour l'industrie extractive dans l'économie circulaire?

EU Circular Economy Action Plan



Étant donné que la moitié des émissions totales de gaz à effet de serre et plus de 90 % de la perte de biodiversité et du stress hydrique *résultent de l'extraction et de la transformation des ressources*, le pacte vert pour l'Europe a lancé une stratégie concertée pour une économie neutre pour le climat, efficace dans l'utilisation des ressources et compétitive... (COM(2020) 98) du 11 mars 2020)

- L'industrie extractive n'est pas incluse dans le narratif de l'économie circulaire!
 - Elle est explicitement externalisée et doit être minimisée!?



Source: Smart Prosperity Institute, 2021, Primary materials in the emerging circular economy, Ottawa, 40 pp.

Les 4 défis de l'Economie Circulaire

- Développer une vision holistique
 - Penser le cycle de vie
 - Material stewardship
 - Disponibilité durable des matériaux
 - Favoriser les symbioses industrielles
 - Réindustrialisation
 - Circuits courts
 - Mesurer la circularité
 - Indicateurs



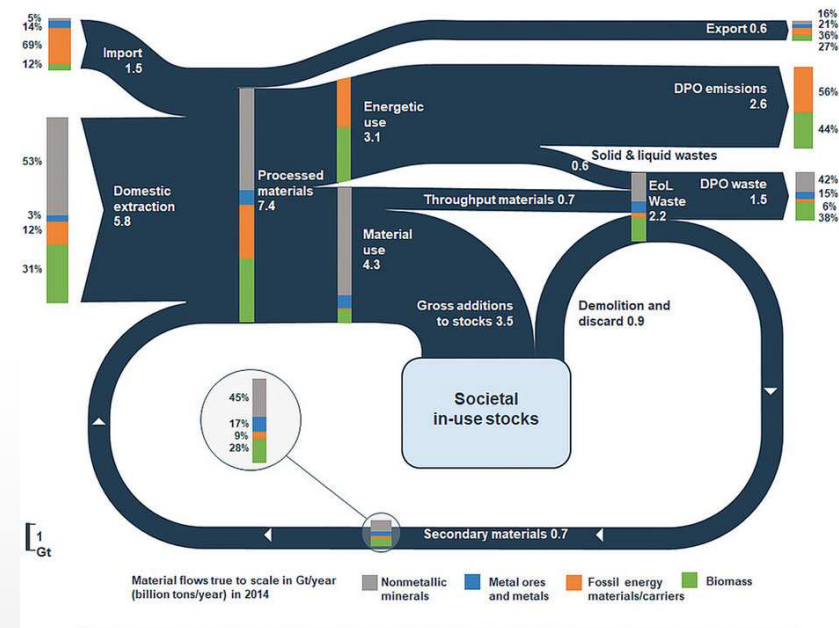
Les indicateurs de l'Economie Circulaire

- End-of-Life Recycling Input Rate (EOL-RIR)
 - ≈ 10% EU28
 - Besoin d'indicateurs au niveau régional, local!
- ! Effet indésirables d'un taux de recyclats (EOL-RIR)

- ↗ si démolition ↗ ou durée de vie du bâti ↘
- ↗ si quantité plutôt que qualité
- ↗ si incitants financiers

○ OR il faut:

- Ralentir la boucle (slow down)
- Promouvoir une économie de la performance (qualité du stock, « caring »)
- Minimiser l'impact environnemental (ACV) (pierre locale vs. béton)

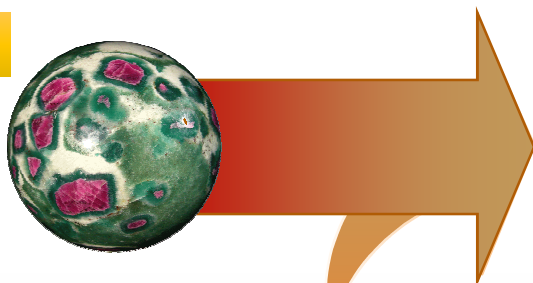


Quelles Ressources pour l'Economie Circulaire?

GEO-SOURCÉ

La notion de **minerai** (réserve) est une notion **économique** (dynamique)

Code Minier Wallon...



ECO-SOURCÉ

Notion de **déchet** est une notion **législative** (plus statique)

Plan Wallon des Déchets-Ressources

Les Géorressources

*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 m² 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 !

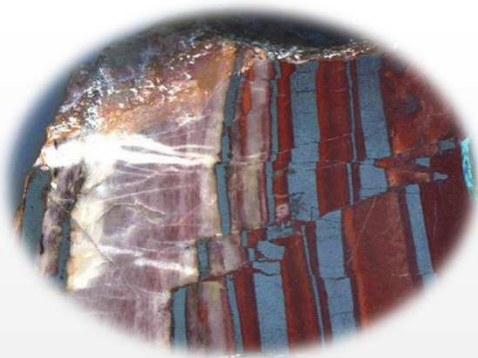
Le monde des géoressources

- **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.



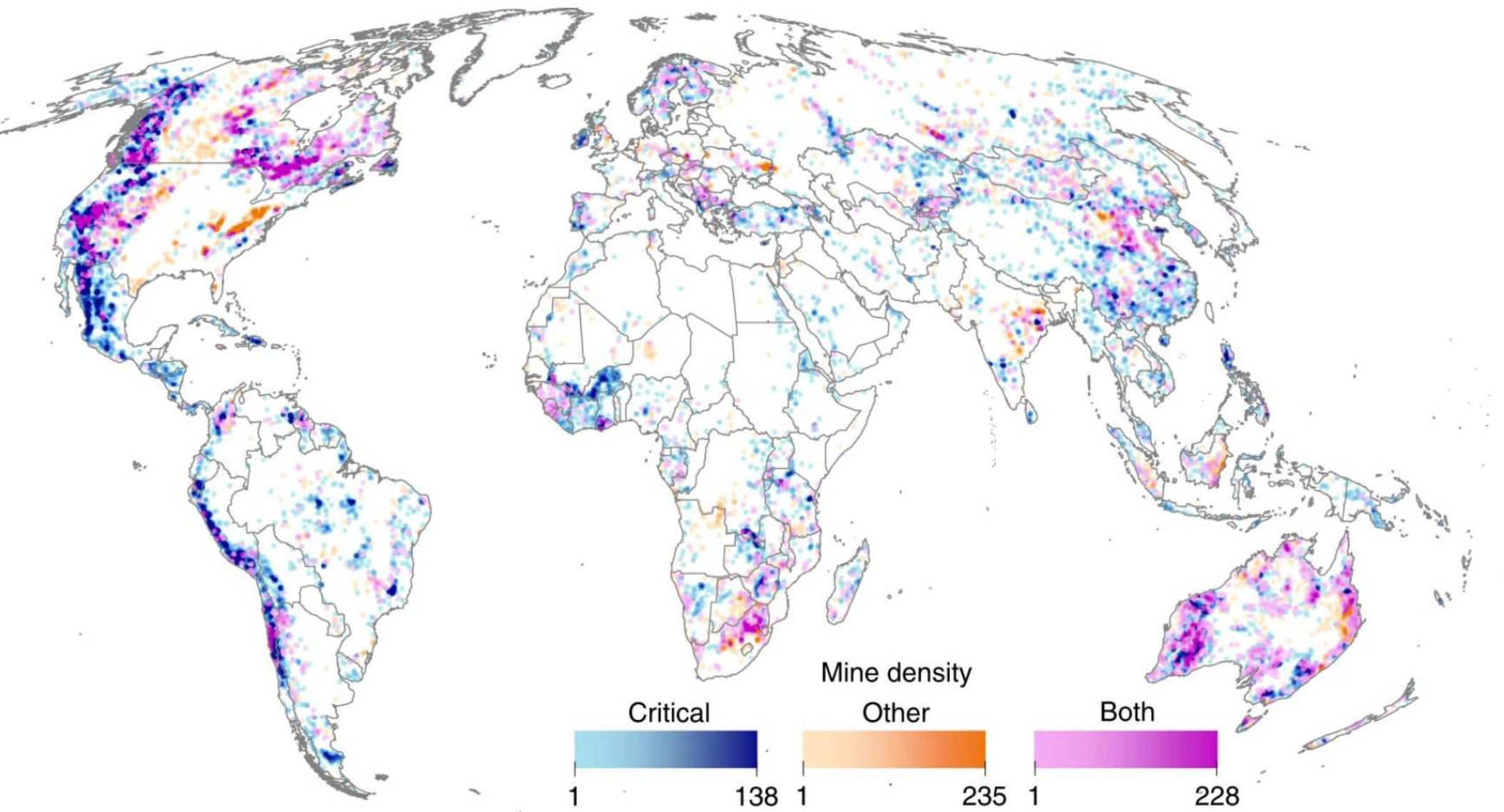
Minerai de fer (60 % Fe)



Minerai de cuivre (0,4% Cu)

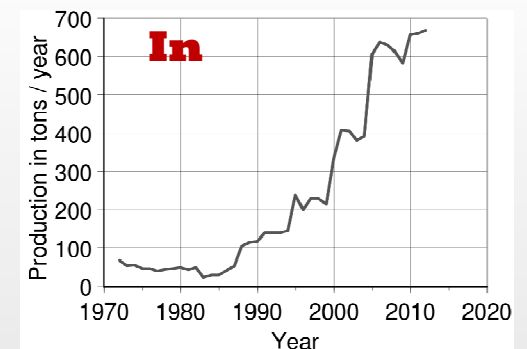
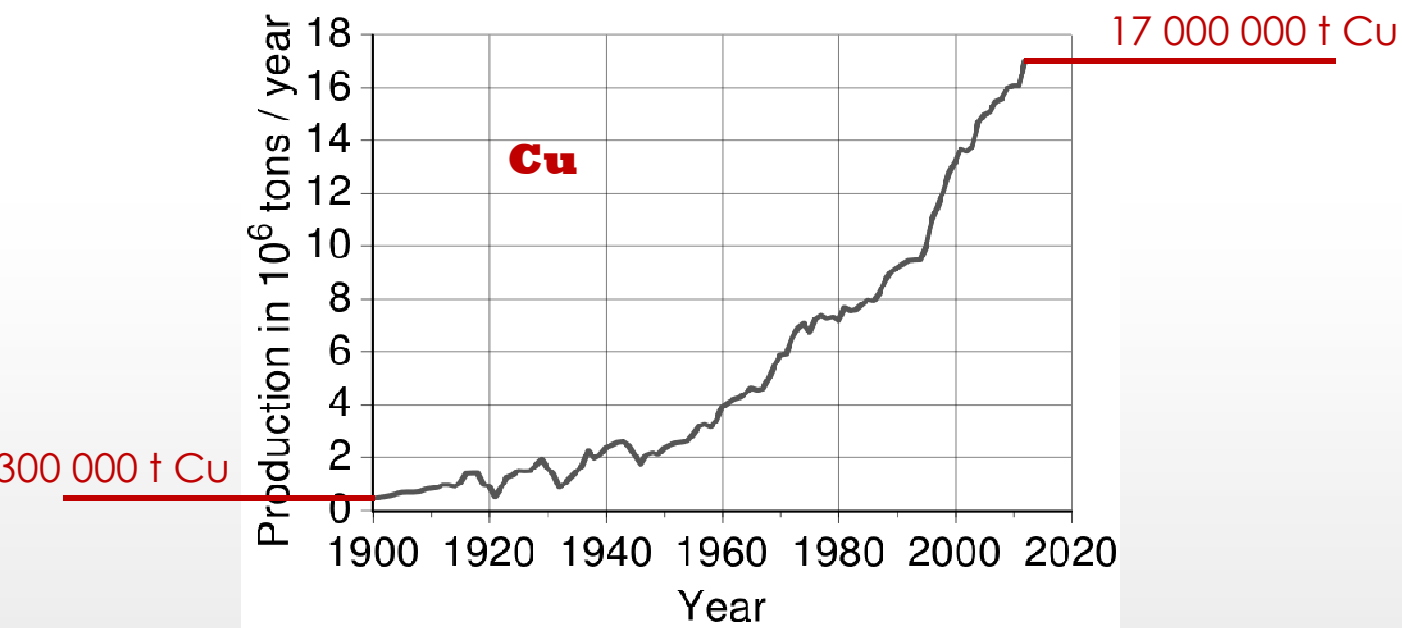


Minerai d'or (1 g/t Au)



Un siècle d'extractivisme!

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



Un défi économique



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



1500 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

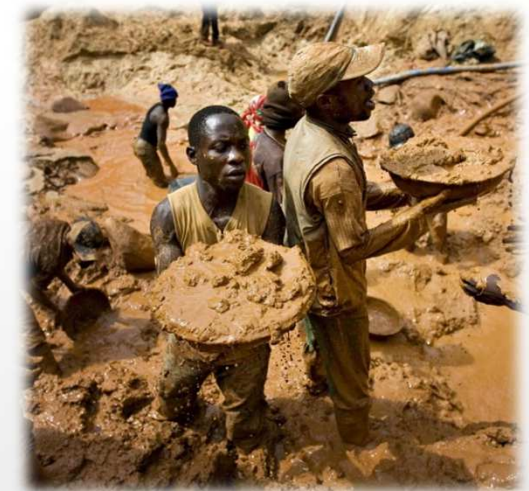


- Les défis du développement durable et de la responsabilité sociétale
 - Artisanat = 20% de la production congolaise mais > 90% des « mineurs »



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

275 000 t/jr

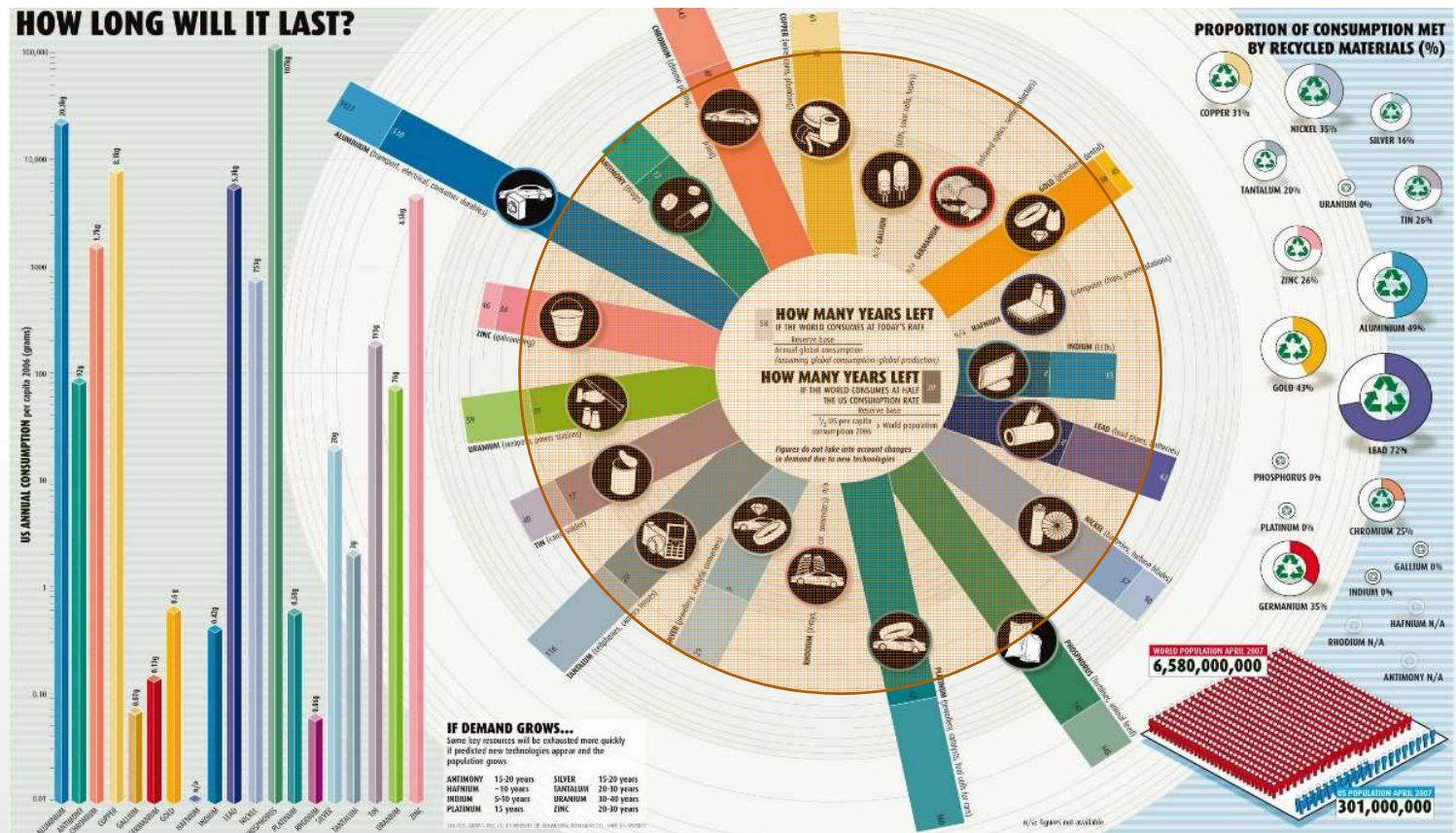


Mines artisanales (DRC)
5 000 t Co/an - 150 000? creuseurs

Pourquoi certaines matières premières
seraient-elles devenues **critiques** ?
Au moins trois dimensions...

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



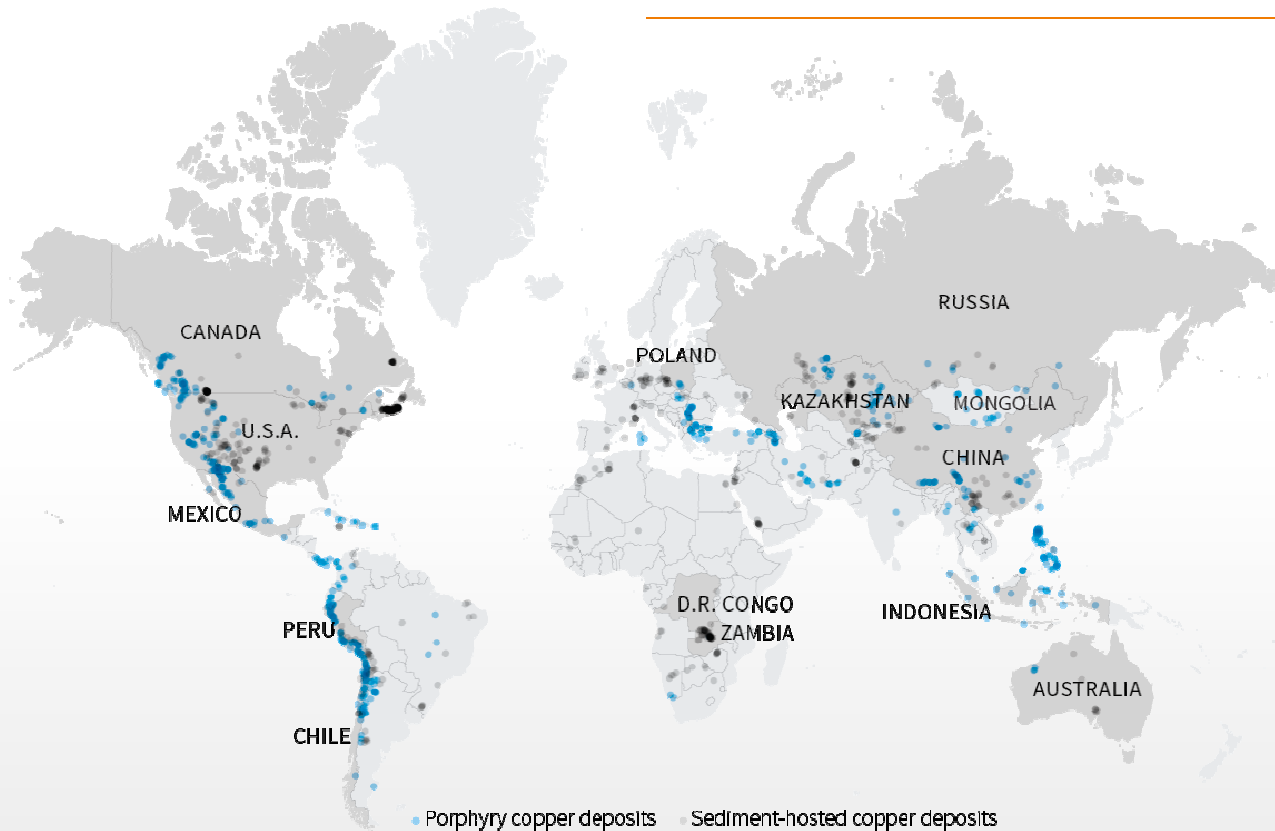
Commodity	Reserves 1999	Annual Production 2000	Lifetime +5% Scenario
Zinc	190 Mt	7,75 Mt	16 ans
Aluminium	25 Gt	123 Mt	48 ans
Indium	?? t	200 t	?? ans
Nickel	46 Mt	1,1 Mt	22 a
Tin	8 Mt	207 kt	21 a

ZINC en 2016

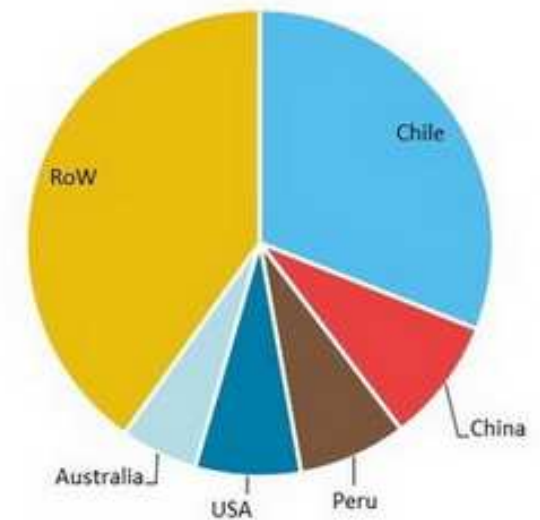
200 Mt (réserves mondiales)
13,4 Mt (production mondiale annuelle)

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)

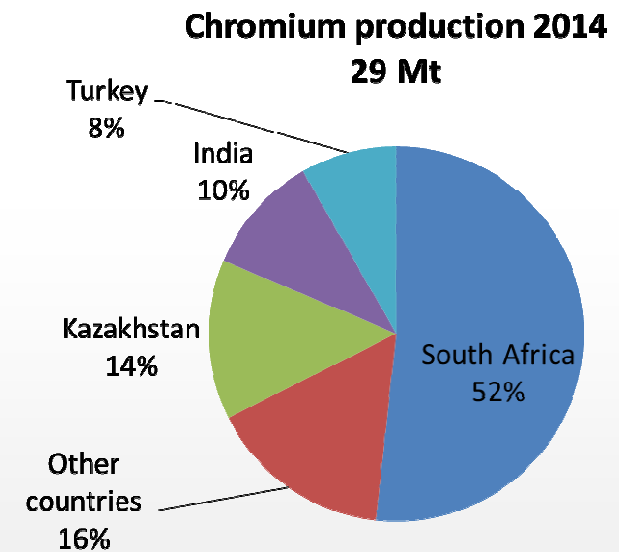
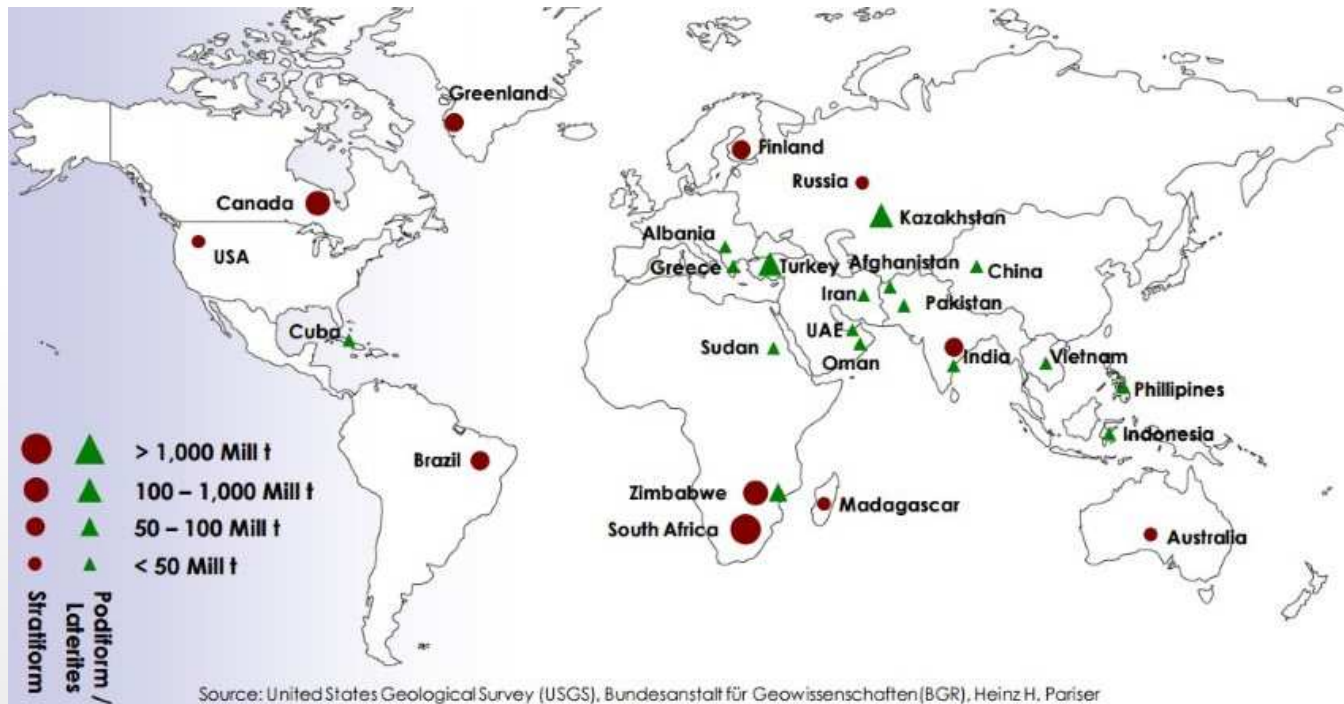


World Mine Production of Copper



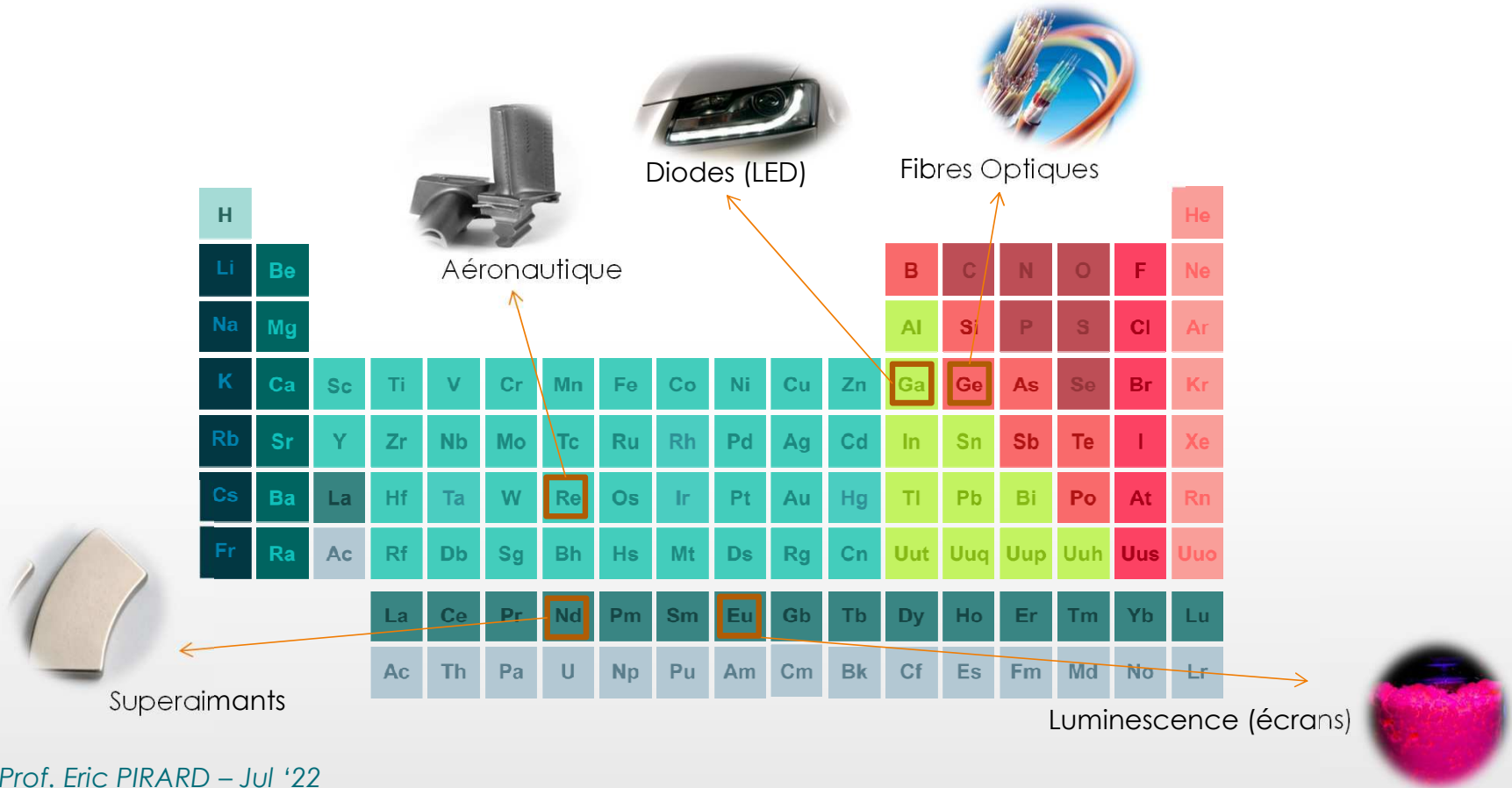
Répartition mondiale des principaux gisements de cuivre

2. La dimension Géopolitique (Stratégique)



Répartition mondiale des principaux gisements de chrome

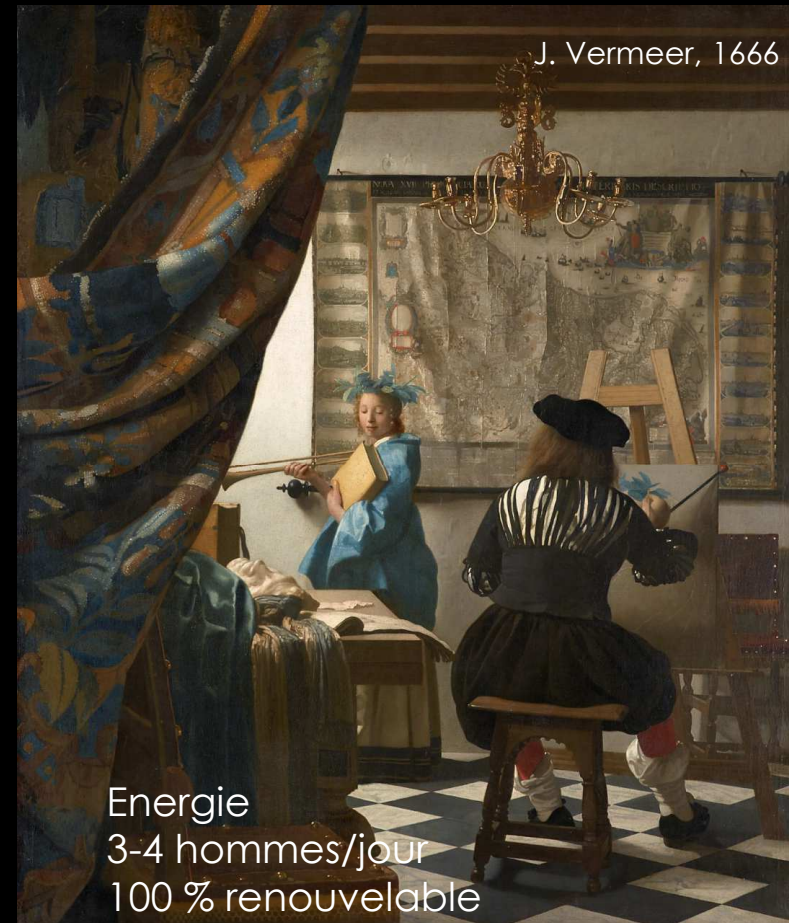
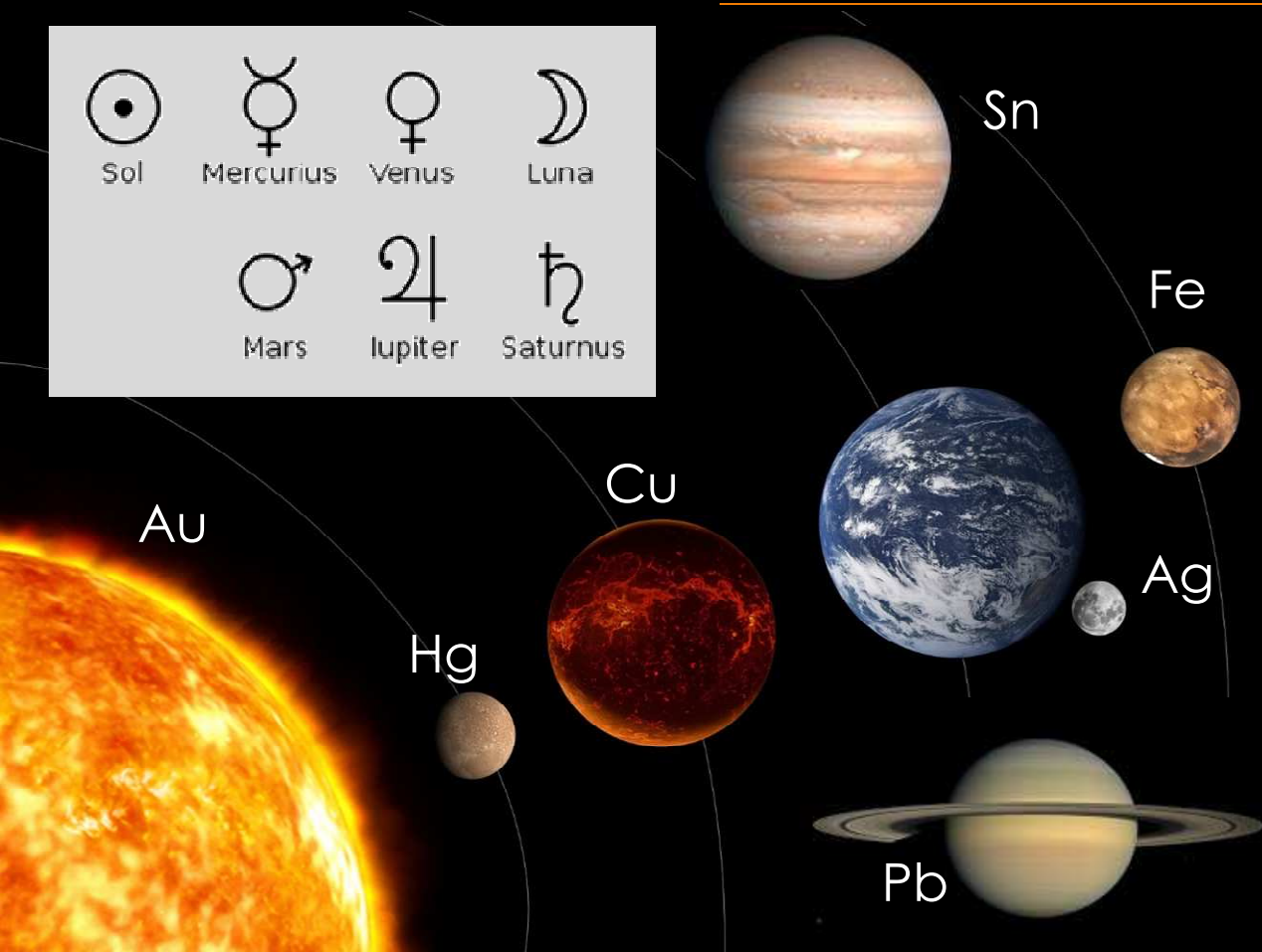
3. La dimension Technologique (Critique)



Des Métaux et des Hommes

Croissance de l'Anthroposphère

Alchimie, Astrologie & Métaux



Science, Technologie & Métaux

118 éléments – 91 métaux

3	4																	5
Li	Be																	B
11	12															13	14	
Na	Mg															Al	Si	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33				
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As				
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52			
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te			
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84			
Cs	Ba	-71	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po			
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116			
Fr	Ra	-103	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv			

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Known in antiquity	known by 1915
known when (alk) Lavoisier published his list of elements (1789)	known by 2000
known by Mendeleev published his periodic table (1869)	known by 2012
known by Dorn published his periodic table (1923)	



Energie
400 hommes/jour
< 20 % renouvelable

Ceci n'est pas de l'argent

Maillechort
75% Cu 20% Zn 5 % Ni

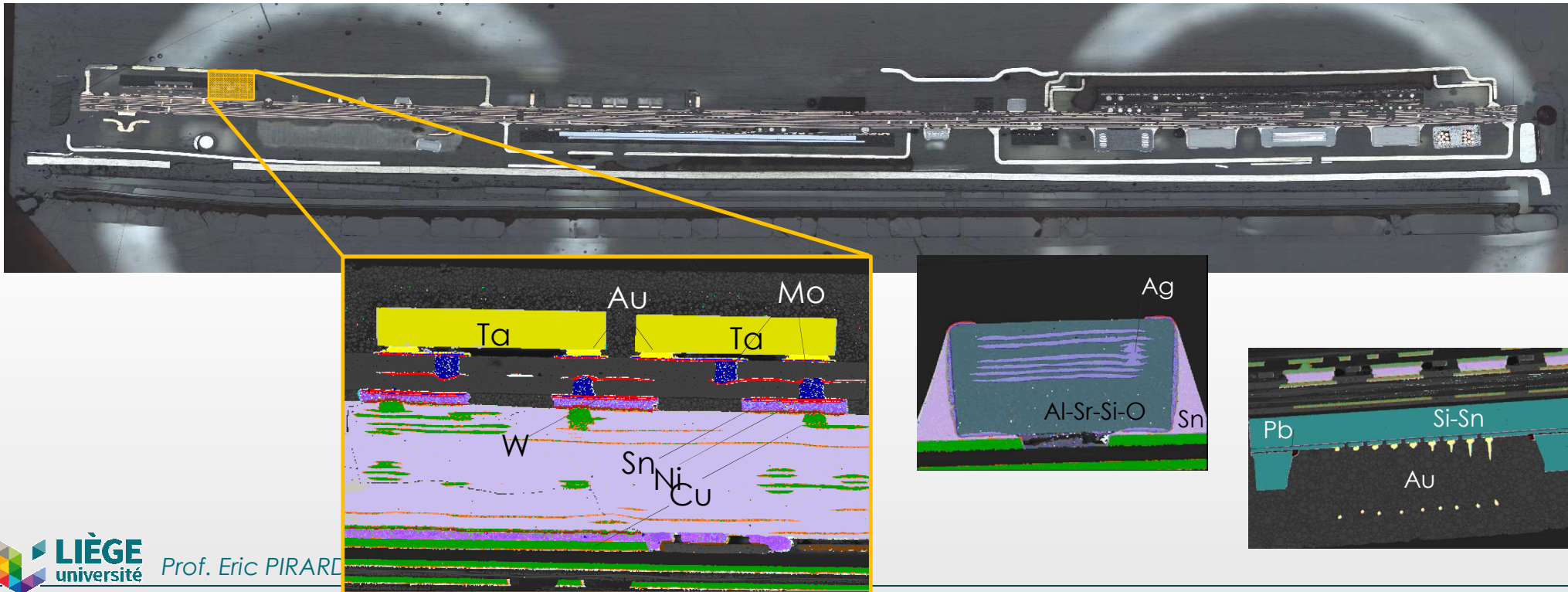
German Silver
75%Cu 25% Ni



Nordic Gold
89% Cu 5% Al 5% Zn 1% Sn

Ceci n'est plus un téléphone

- DEEE - Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques
 - Nanomatériaux, Microélectronique, Confidentialité des compositions,...



Génération BIC



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 (VHU) \approx 15 kg/pers.an
 - PMC (Plastique – Métal – Carton) \approx 16 kg/pers.an

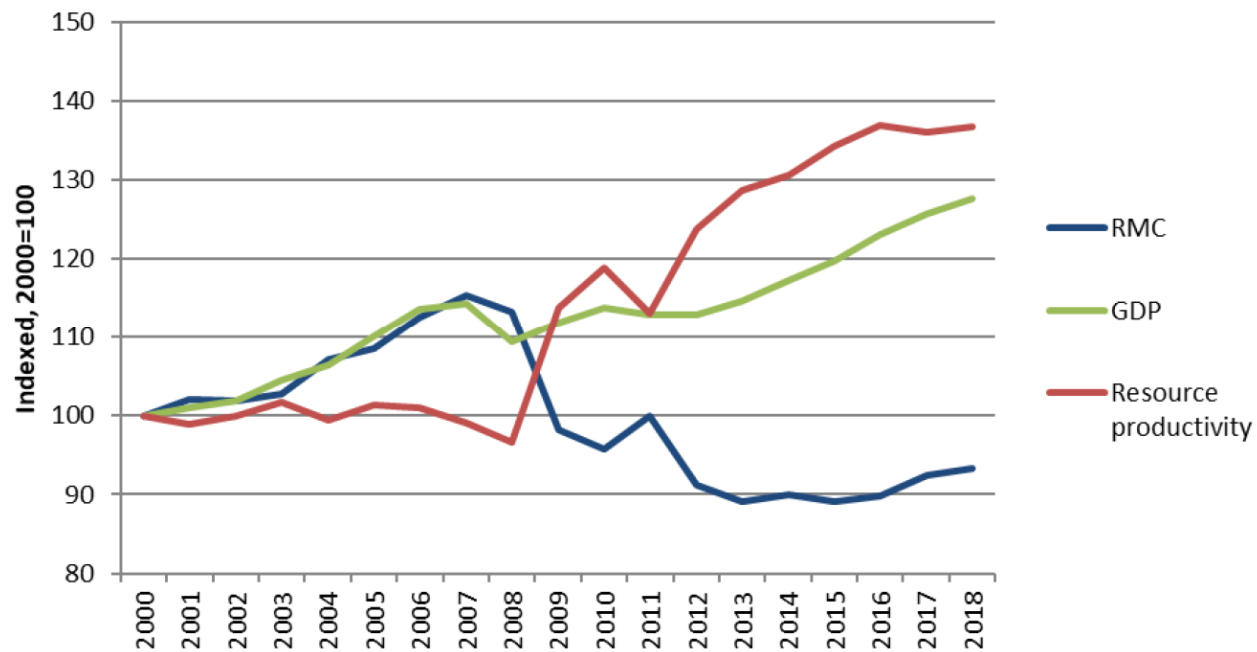


Vers une Croissance Verte

La face cachée du Green Deal

Vers une Croissance Verte

- Dématérialisation ?



eurostat

Handbook for estimating
raw material equivalents

of imports and exports and RME-
based indicators on the country level
– based on Eurostat's EU RME model

November 2020

RMC

Raw Materials Consumption

vs.

IMP-RME

Raw Material Equivalents of Imports

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

Vers une Croissance Verte

- Dématérialisation ?



*Mini pèse 600kg
en 1960*

*Mini SE pèse 1440 kg
en 2021*

Vers une Croissance Verte

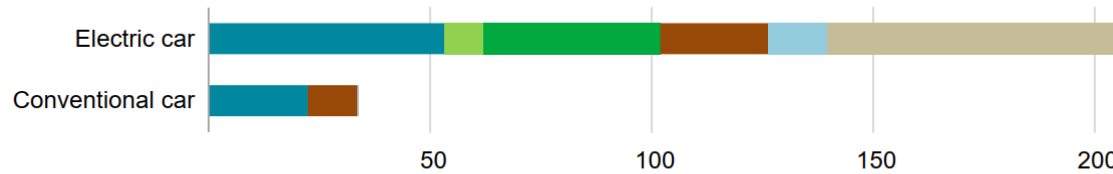
- IEA (2021)

The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions

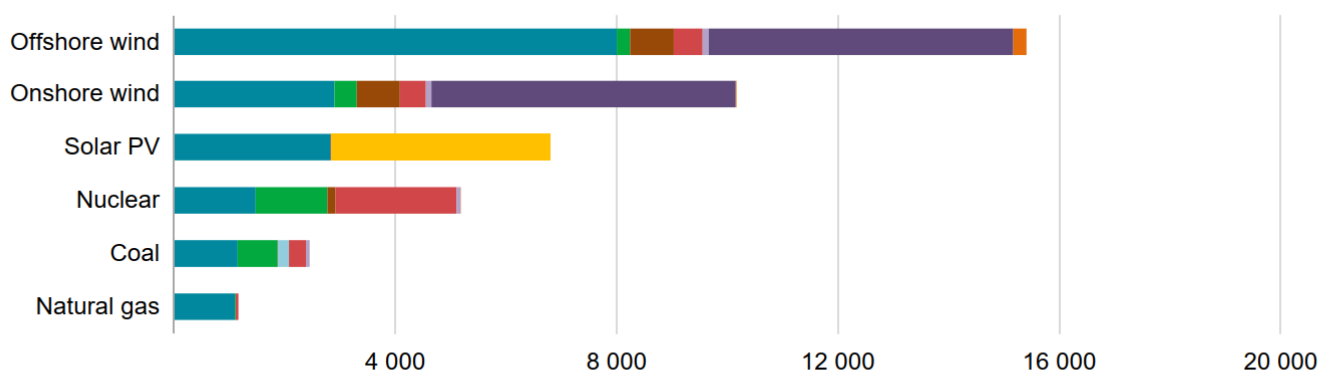


Minerals used in selected clean energy technologies

Transport (kg/vehicle)



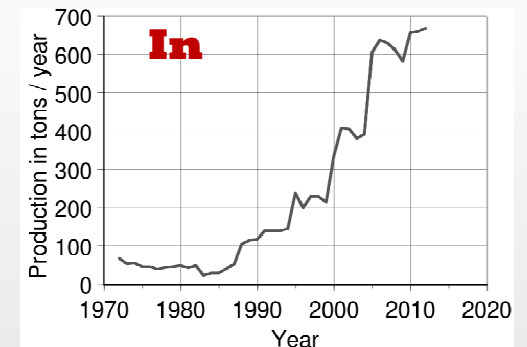
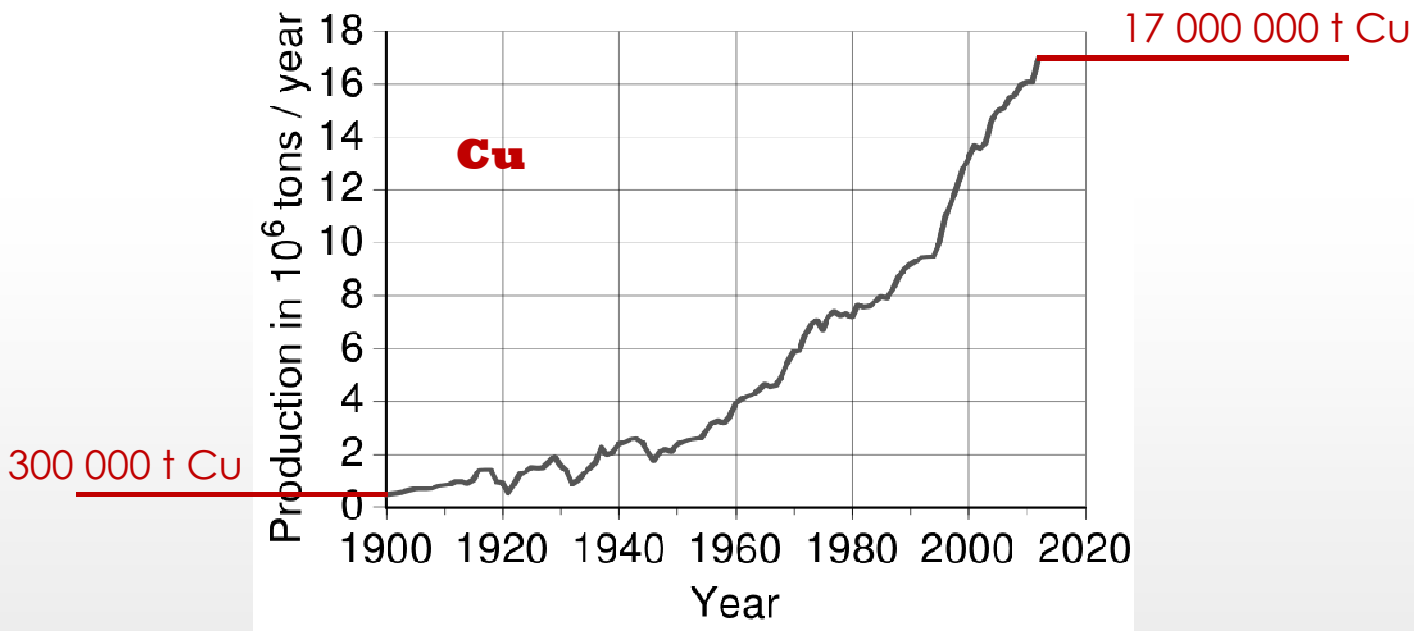
Power generation (kg/MW)



IEA. All rights reserved.

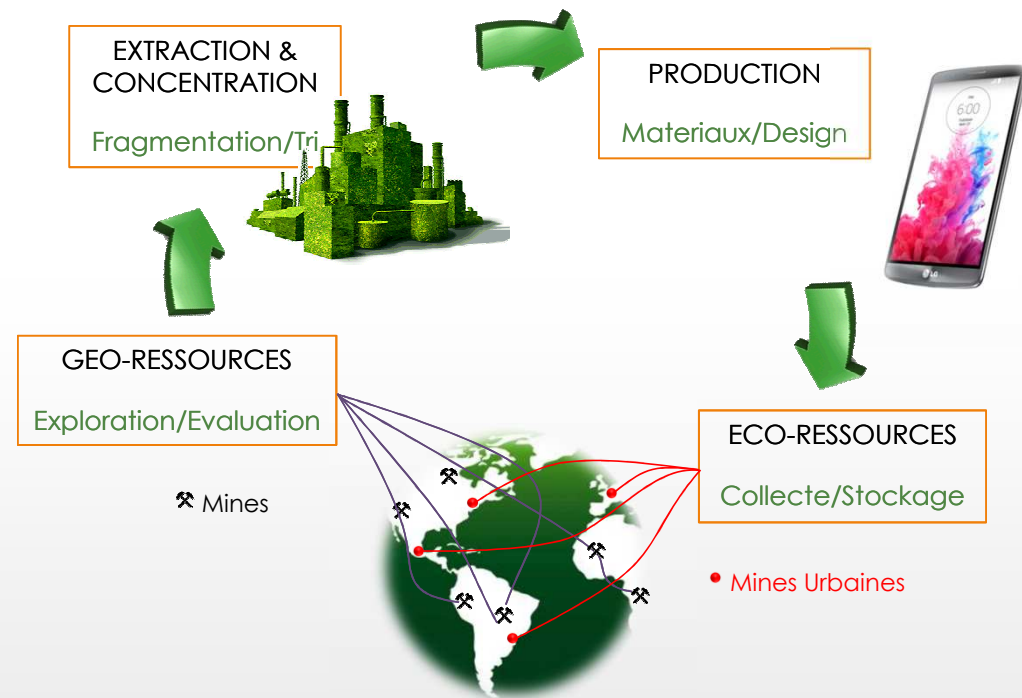
Vers une Croissance Verte

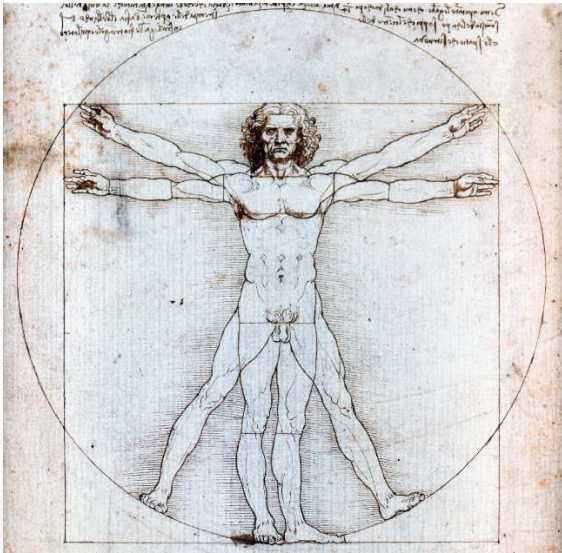
- Un siècle d'extractivisme...et ce n'était que le début!
 - **#EuropeanWayofLife** = 5 tonnes de minerai de cuivre / par personne.an



Vers une Croissance Verte

- Penser le cycle de la matière
 - ... et pas seulement le carbone





La quadrature du cercle

Penser une économie plus circulaire

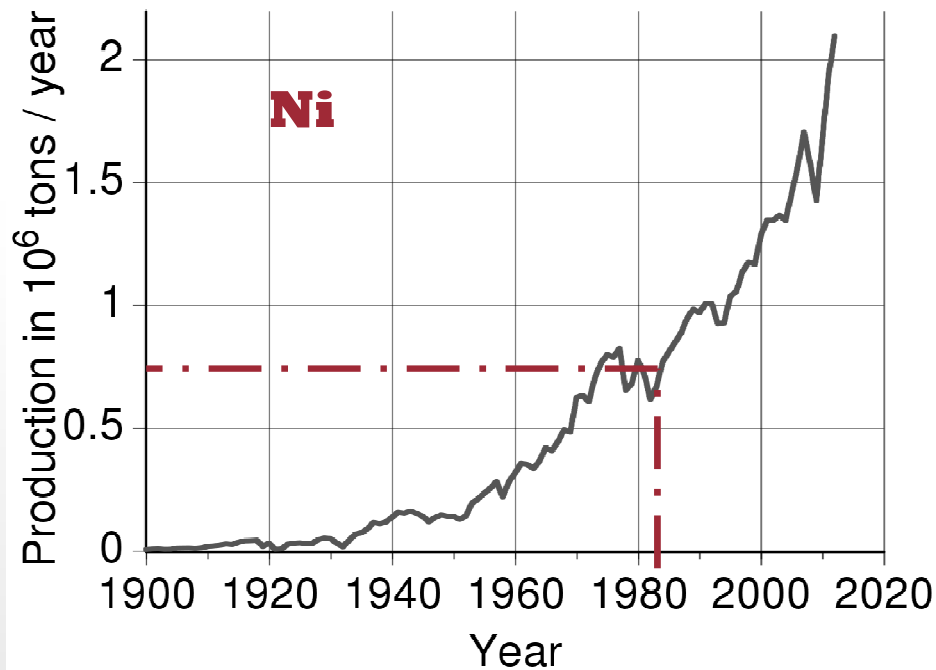
Penser le cycle

- Les quatre défis de l'économie circulaire



Défi 1 : FEED the loop

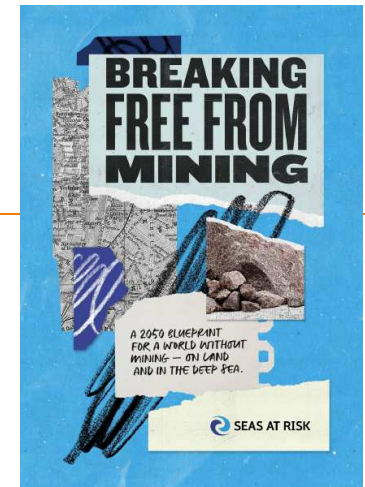
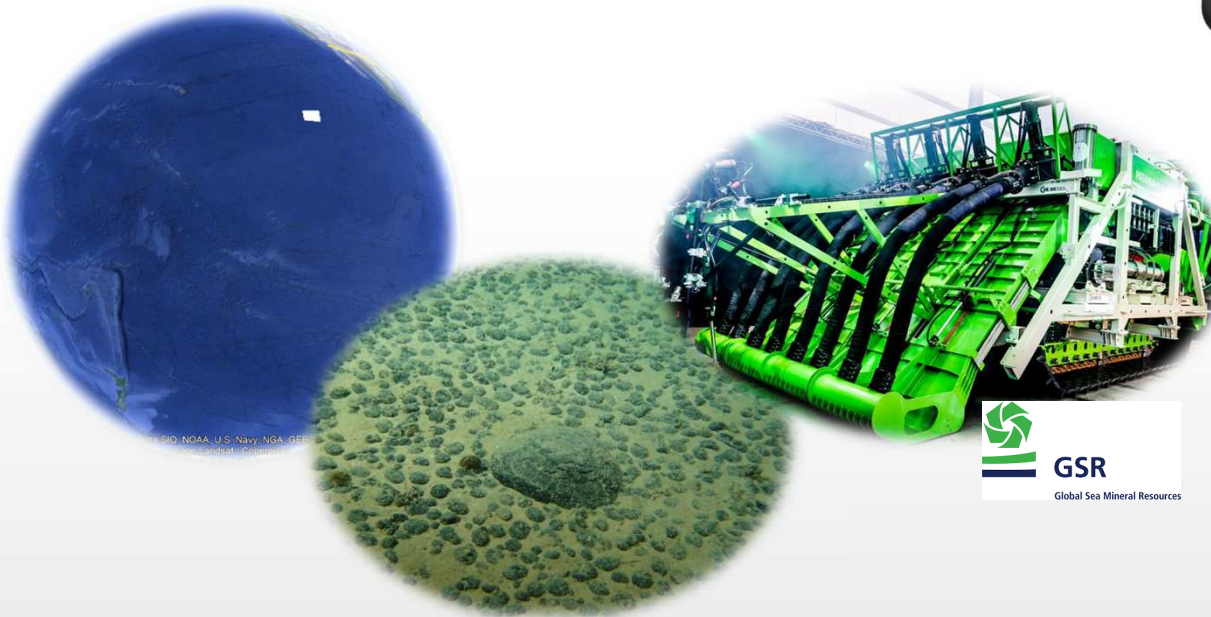
- Le recyclage, même parfait est insuffisant pour nos besoins



Le Nickel disponible pour le recyclage a 40 ans et ne peut satisfaire au mieux que 30 % des besoins actuels

Défi 1 : FEED the loop

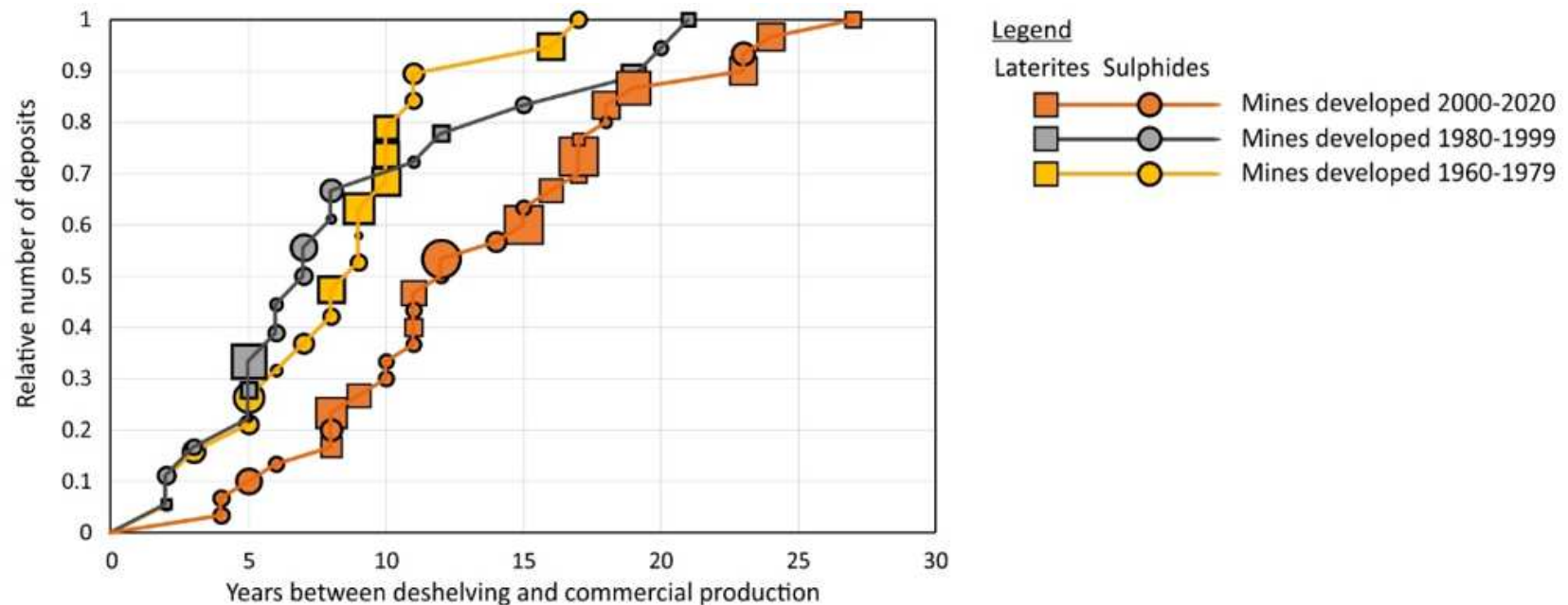
- Opposition sociétale virulente
 - ex. Exploitation des nodules polymétalliques du Pacifique



(Oxy)Hydroxydes de Manganese-Nickel-Fer-Cobalt

Défi 1 : FEED the loop

- Délai croissant entre découverte et mise en production!
 - *Nickel mines (Heijlen et al., 2021)*



Défi 2 : DESIGN the loop

- Repenser notre design
 - Simplifier le désassemblage
 - Limiter l'utilisation de colles
 - ...



Engineering is the art of eliminating parts, Charles Brown (1900)

Défi 2 : DESIGN the loop

- Repenser notre design
 - Anticiper le recyclage
 - Eviter les matériaux composites non indispensables

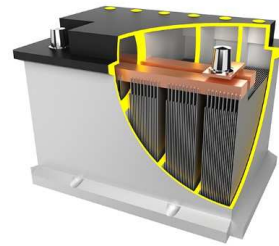


Défi 2 : DESIGN the loop

- La recyclabilité des produits s'est dégradée

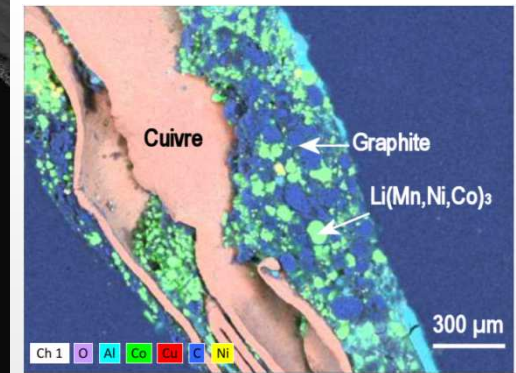
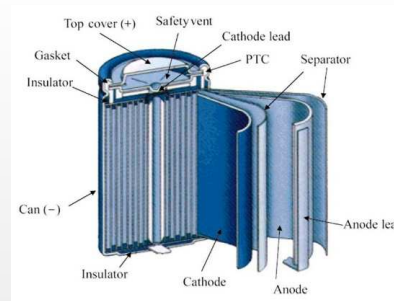
- Batteries Pb-acide

- Collecte et recyclage optimal

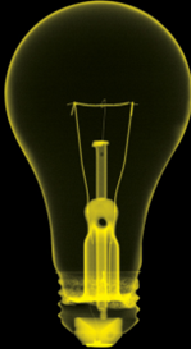





- Batteries Li-ion

- Problèmes de tri
- Récupération limitée du Co, Ni, ...
- Non-récupération du graphite, Li, ...



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.

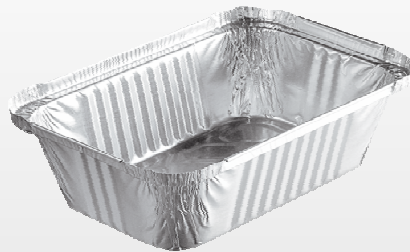
Défi 3 : SLOW DOWN the loop

- Maîtriser notre fringale technologique
 - Education du consommateur
 - Nouveaux « modèles d'affaires »
 - Economie de la fonctionnalité / Economie du partage
 - Right to Repair
 - Pièces de rechange, manuels de réparation



Défi 3 : SLOW DOWN the loop

- Bannir l'usage unique
 - Favoriser la réutilisation
 - Encourager le « durable »



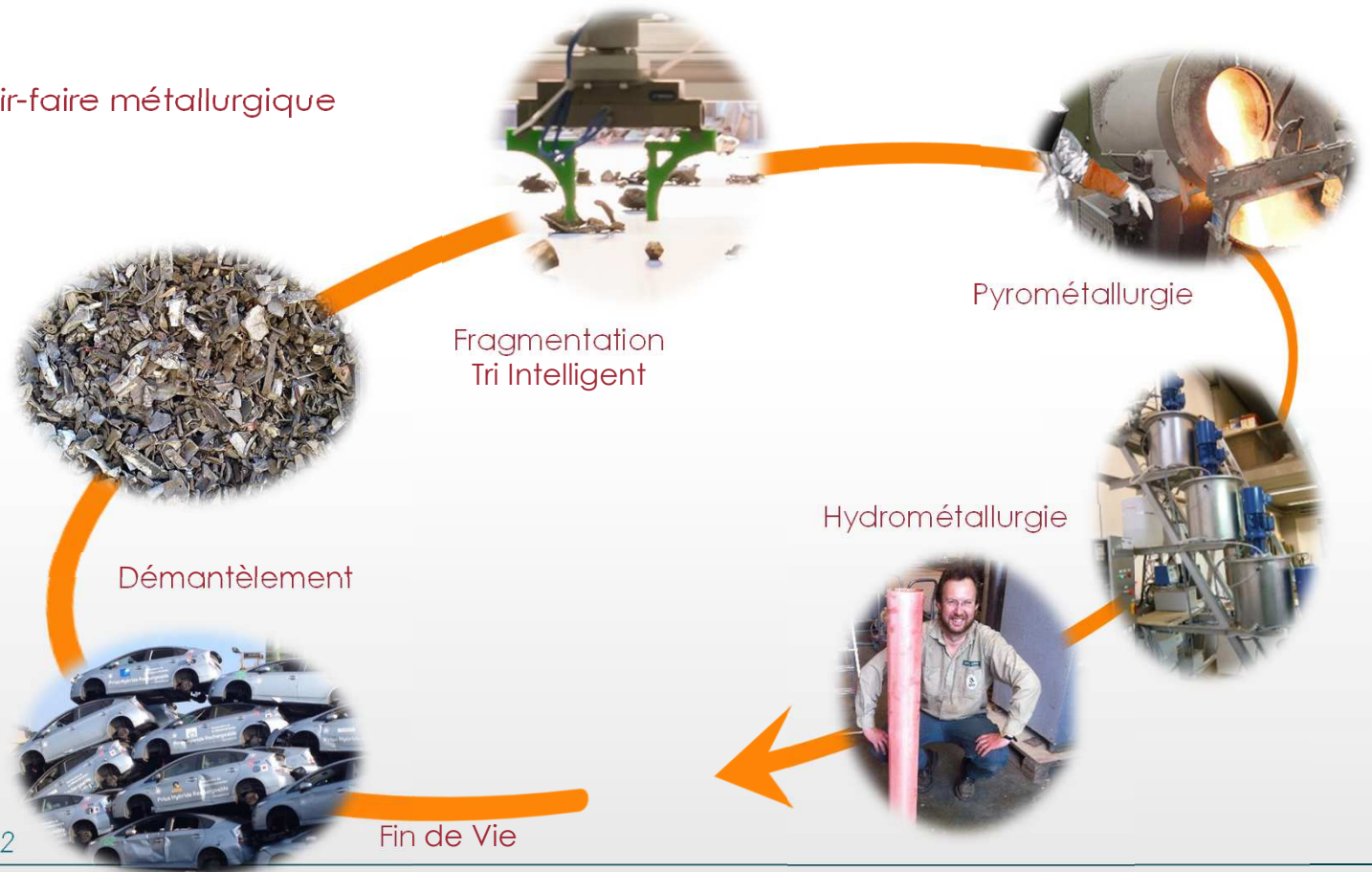
Défi 3 : SLOW DOWN the loop

- Etendre la durée de vie de tous les produits
 - Encourager les garanties longue durée



Défi 4 : CLOSE the loop

- La Mine Urbaine
 - Remobilisation du savoir-faire métallurgique



Défi 4 : CLOSE the loop

- La Mine Urbaine
 - Défi de la collecte de produits dispersés?
 - Valeur résiduelle faible de la matière (1€/GSM)



Défi 4 : CLOSE the loop

- La Mine Urbaine
 - Trier – Trier -Trier!
 - Robotique et Intelligence Artificielle MultiCapteurs



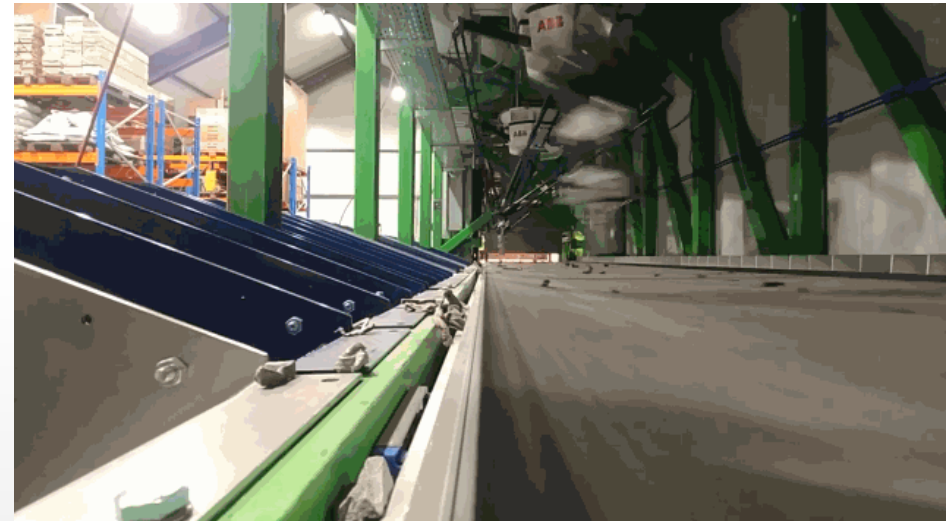
SS304

18 % Cr
8 % Ni



SS316

16 % Cr
10 % Ni
2 % Mo



Prototype MultiPick

Reverse Metallurgy en Wallonie

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*

Métallurgie Extractive du Cuivre



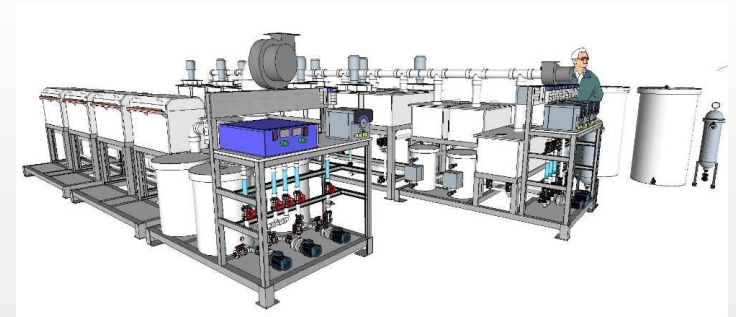
- Récupération du cuivre par dissolution des phases cuprifères complexes



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

