



Où trouver les métaux pour les technologies du futur?

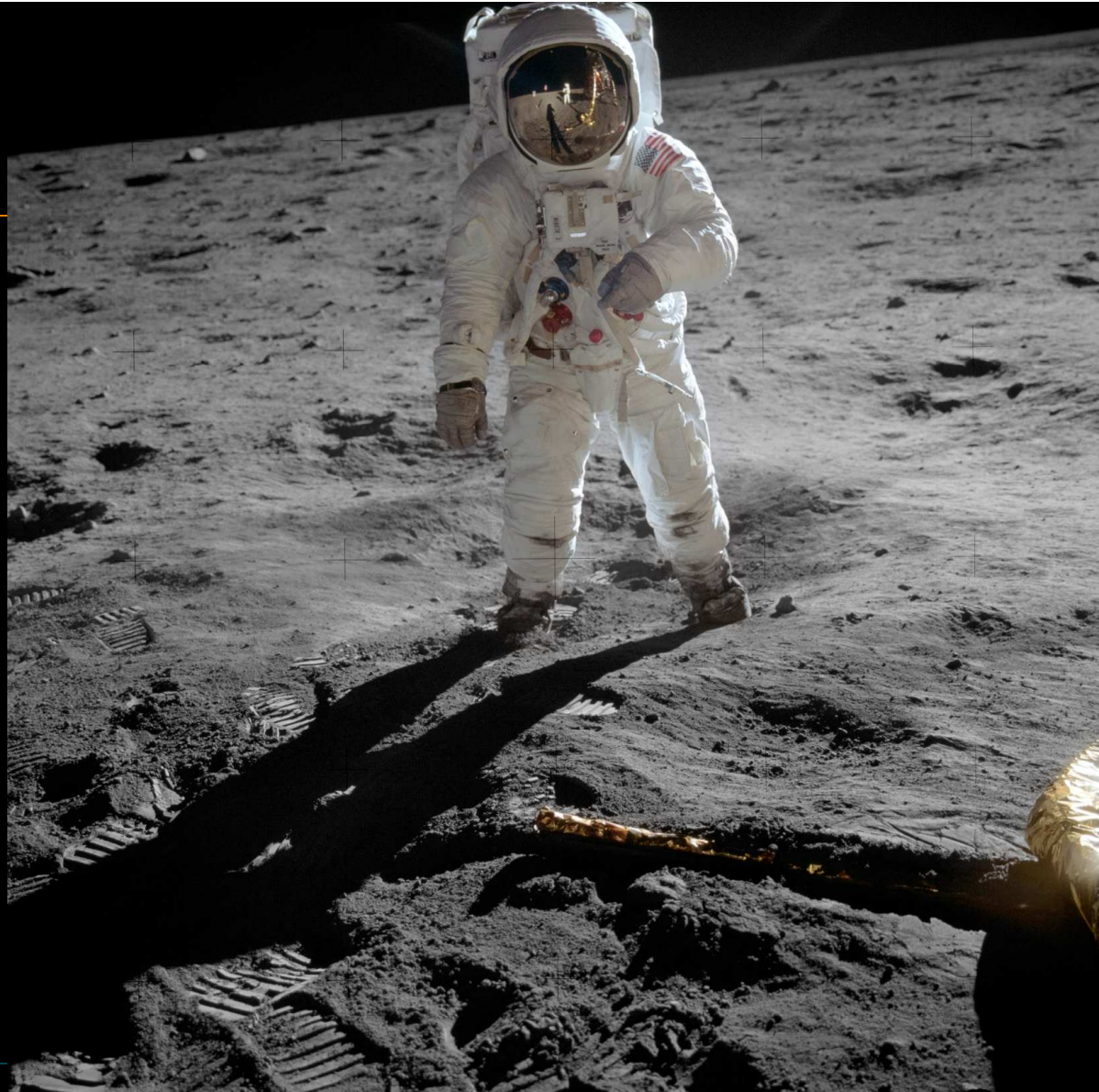
Eric PIRARD

CEPULB – Bruxelles - 16 Janvier 2020

Dans l'espace?



Le 11 juillet 2019, Hayabusa 2 a prélevé un échantillon de l'asteroïde 162173 Ryugu. Il reviendra sur terre fin 2020.



Dans l'espace?



NOTRE AVENIR À TOUS



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

Introduction de Gro Harlem Brundtland

Éditions LAMBDA

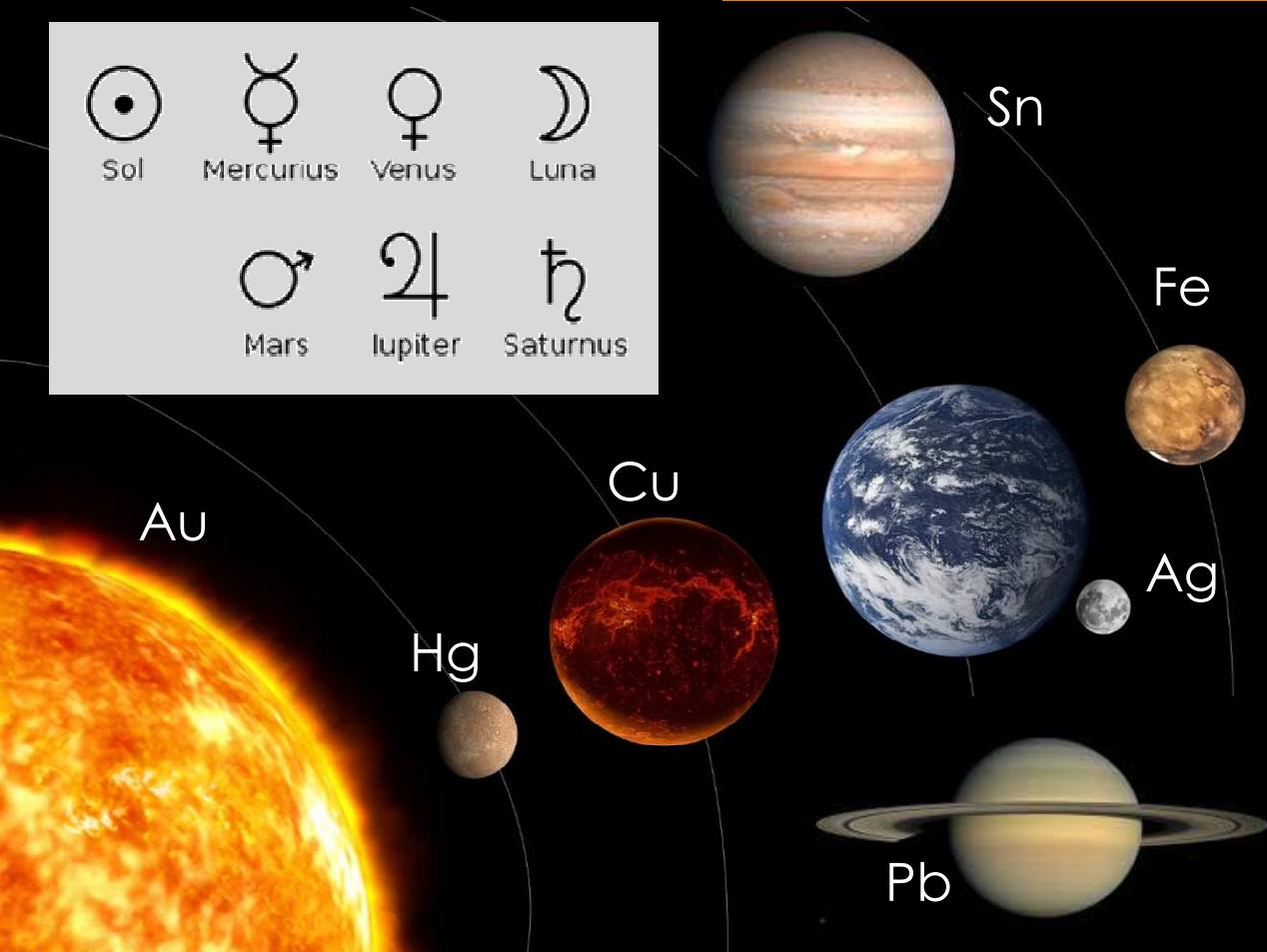
Alternatives



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.

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 | | | |

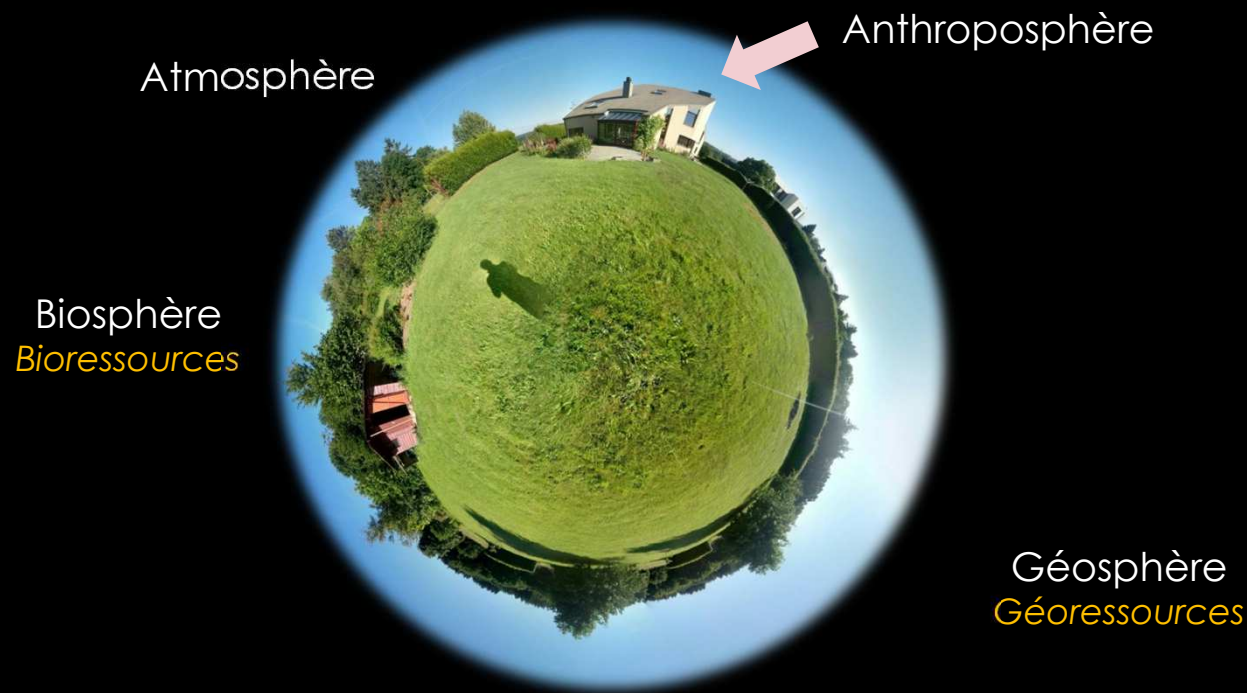
| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
| La | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
| 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 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 before published his periodic table (1869) | known before published his periodic table (1911) | known before published his periodic table (1923) | known before published his periodic table (1945) | known before published his periodic table (2003) | known in 2012 |
|--------------------|--|--|--|--|--|---------------|



Économie

- o 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!

Métaux et Technologies

Un peu d'histoires

Une histoire du **ROUGE**

Métaux et Technologies – Une histoire du **ROUGE**

- Préhistoire
 - Matériaux naturels (argiles, silex, ocres, ...)
 - Abondants
 - A durée de vie « illimitée »
 - Utilisation qui les laisse dans le cycle naturel



Ocres - Oxydes de fer et manganèse naturels
Hématite Fe_2O_3 ; Goethite $\text{Fe}(\text{OH})_3$; ...



Rustrel - Colorado Provençal



« Terre de Sienna » brûlée

Métaux et Technologies – Une histoire du **ROUGE**

- Moyen Age et Temps Modernes
 - Matériaux naturels (minéraux, minerais métalliques, ...)
 - Rares et précieux (commerce, conflits,...)
 - Transformations simples
 - Longue durée de vie



Rouge vermillon
Cinabre HgS
Sulfure de mercure naturel



Cinabre



Almaden (ES) 2000 ans activité extractive

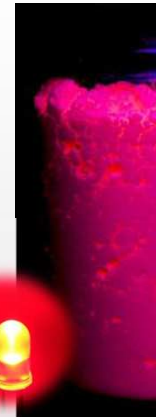


Métaux et Technologies – Une histoire du **ROUGE**

- Epoque Contemporaine
 - Minerais spécifiques (flux internationaux)
 - Transformations complexes (synthèse)
 - Durée de vie éphémère



Bastnaesite (REE)CO₃F
Bayan Obo - Chine.



Luminophore rouge
Oxyde d'Yttrium Y2O3
Dopage 5% Eu3+

© smart-elements.com

Une histoire **ÉCLAIRANTE**

Métaux et Technologies – Une histoire **ÉCLAIRANTE**

400 000 ans de progrès

- Silex (SiO_2) contre Marcassite (FeS_2)
 - Embrassement des éclats – combustion
- Silex contre Fer
 - « Battre le briquet »



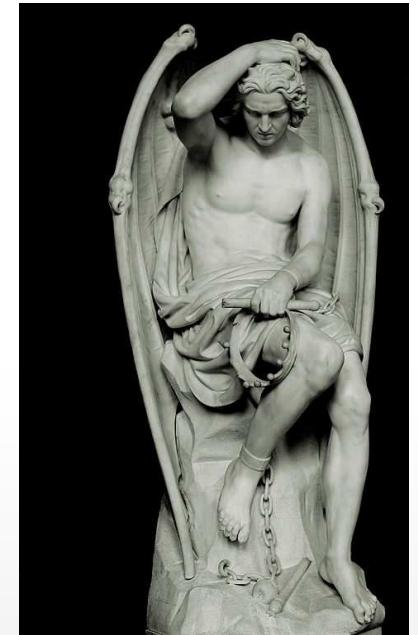
Métaux et Technologies – Une histoire **ÉCLAIRANTE**

1669

- Porteur de Lumière (P)
 - Découverte d'un résidu luminescent dans l'urine
- Allumettes
 - Bâtonnets imprégnés de Sb_2S_3 , KClO_3 ,...

1844

- Safety matches
 - Auto-ignition sur un grattoir (poudre de verre, P rouge)



L'ange Lucifer
Cathédrale St Paul
(Liège)



Lucifers,
Fósforos

Métaux et Technologies – Une histoire **ÉCLAIRANTE**

1885

- Carl Auer (1858-1929)
 - Découverte des terres rares Pr et Nd



1890

- Pierre à briquet
 - Ferrocérium (mischmetall)
 - ✓ 20% Fe; 38%Ce; 22%La; 4% Nd; 4% Pr; 4% Mg



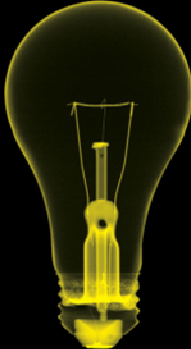

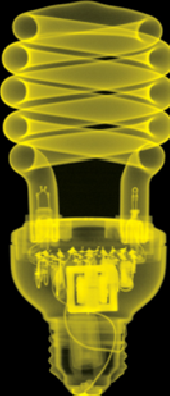

1973

- Marcel Bich (1914-1994)
 - Brique jetable BIC



Métaux et Technologies – Une histoire **ÉCLAIRANTE**

- La fonctionnalité est optimale!

| <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, ... |

Une histoire **d'ÉNERGIES**

Métaux et Technologies – Une histoire d'ÉNERGIES



Métaux et Technologies – Une histoire d'ÉNERGIES

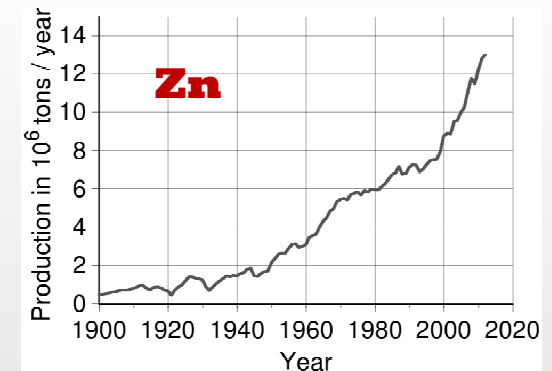
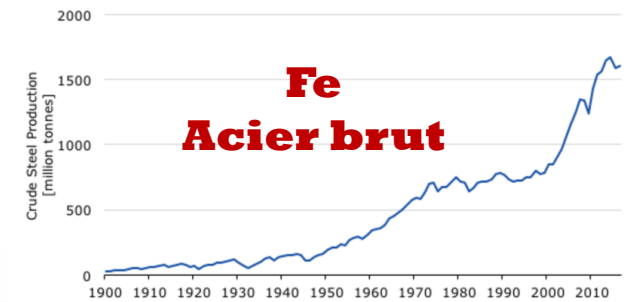
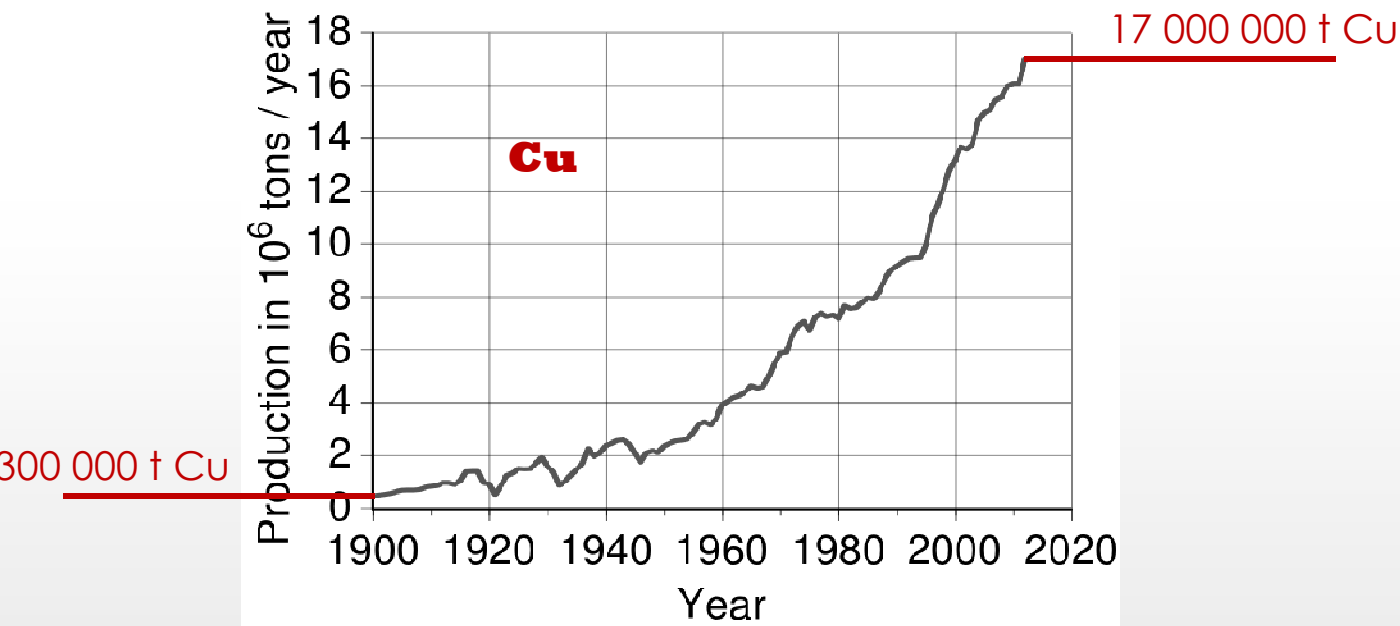


Croissance de l'Anthroposphère

Des Ressources et des Hommes

Un siècle d'extractivisme!

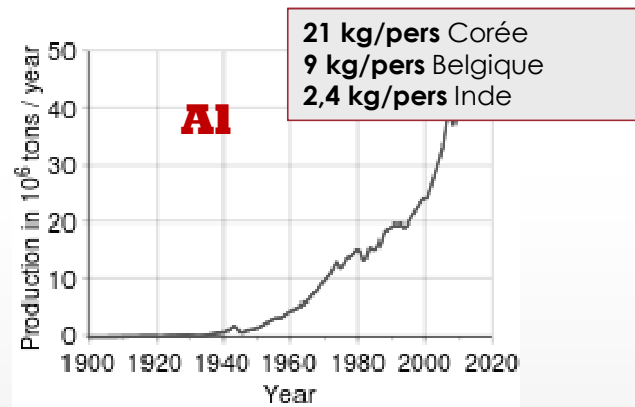
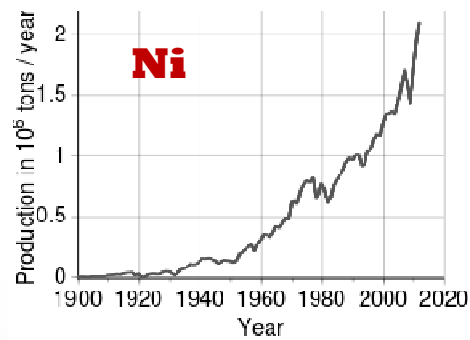
- Croissance exponentielle de la production de tous les métaux
 - **#EuropeanWayofLife** = 5 tonnes de minerai de cuivre / par personne.an



Consommation mondiale de cuivre 1900-2016

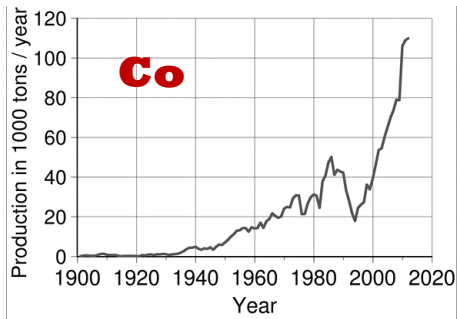
Un siècle d'extractivisme!

- Métaux modernes

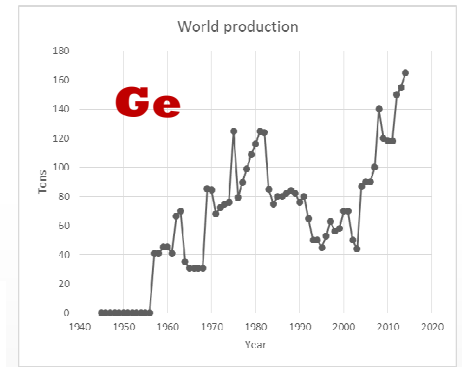
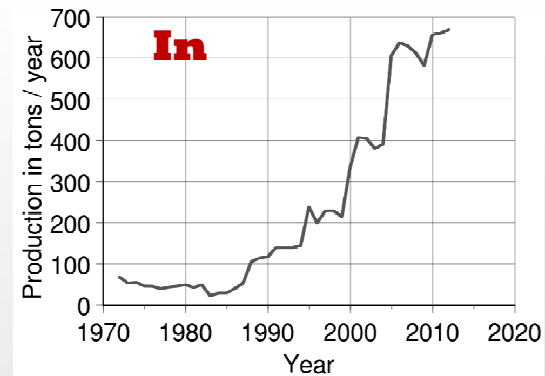
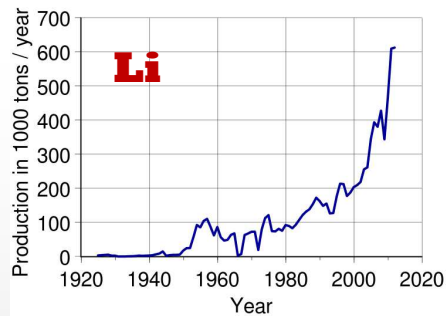


Un siècle d'extractivisme!

- Métaux technologiques



Production mondiale de cobalt (USGS)



En voie de développement!

- Les mineral babies américains et chinois



| USA | | Chine |
|----------|-------------|-------|
| 35 t | Acier (x6) | 6 t |
| 450 kg | Cuivre (x6) | 80 kg |
| 78 g | Or (x2,5) | 30 g |
| 27 t | Ciment (/3) | 90 t |
| 10 t | Phosphates | - |
| 7 t | Argiles | - |
| 250 t | Charbon | - |
| 20 000 l | Pétrole | - |

D'après : SME Mineral Info. Instit. et IIED



Consommation / individu sur base d'un âge moyen de 78 ans.

En voie de dématérialisation ?

- Ou souffrant de TECHNOBÉSITÉ...



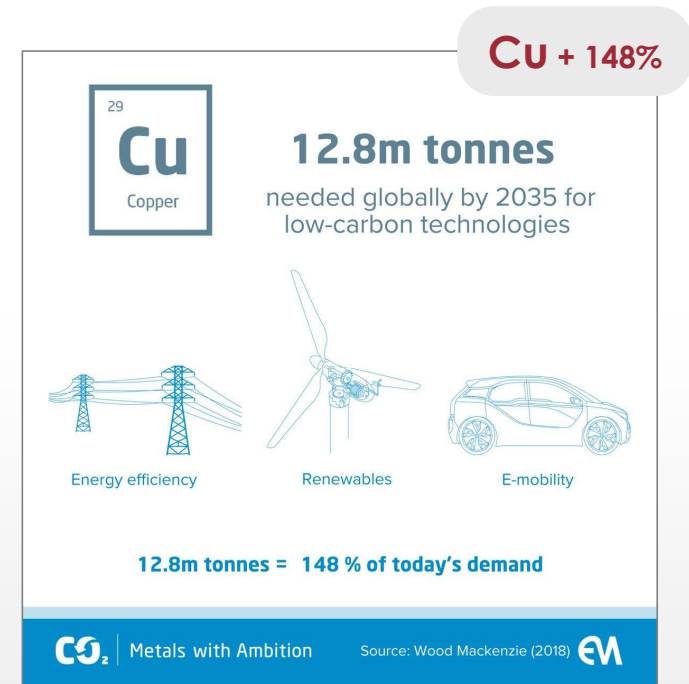
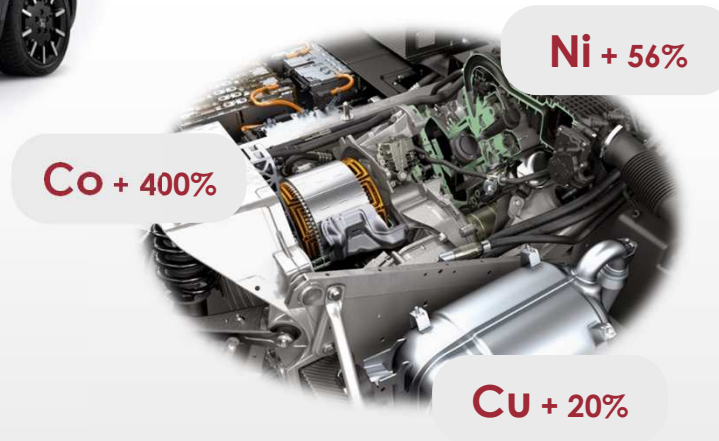
De 600 kg à 1200 kg

En voie de dématérialisation ?

- Ou d'HYPERMATÉRIALISATION...
 - Les besoins de la transition énergétique



Objectif 30% EV en 2030



Demande en métaux pour l' e-mobilité à l'horizon 2030 (CRU)

En voie de dématérialisation ?

- Ou croulant sous ses PROPRES DÉCHETS...
 - 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



En voie de dématérialisation ?

Pourtant... rien ne se perd... selon...

*... Car rien ne naît ni ne périt,
mais des choses déjà existantes se combinent,
puis se séparent de nouveau.*

*Pour parler juste, il faudrait donc appeler
le commencement des choses une composition
et leur fin une désagrégation.*

Anaxagore (c. 500 BC – 428 BC)

Penser le cycle

Vers une économie plus circulaire

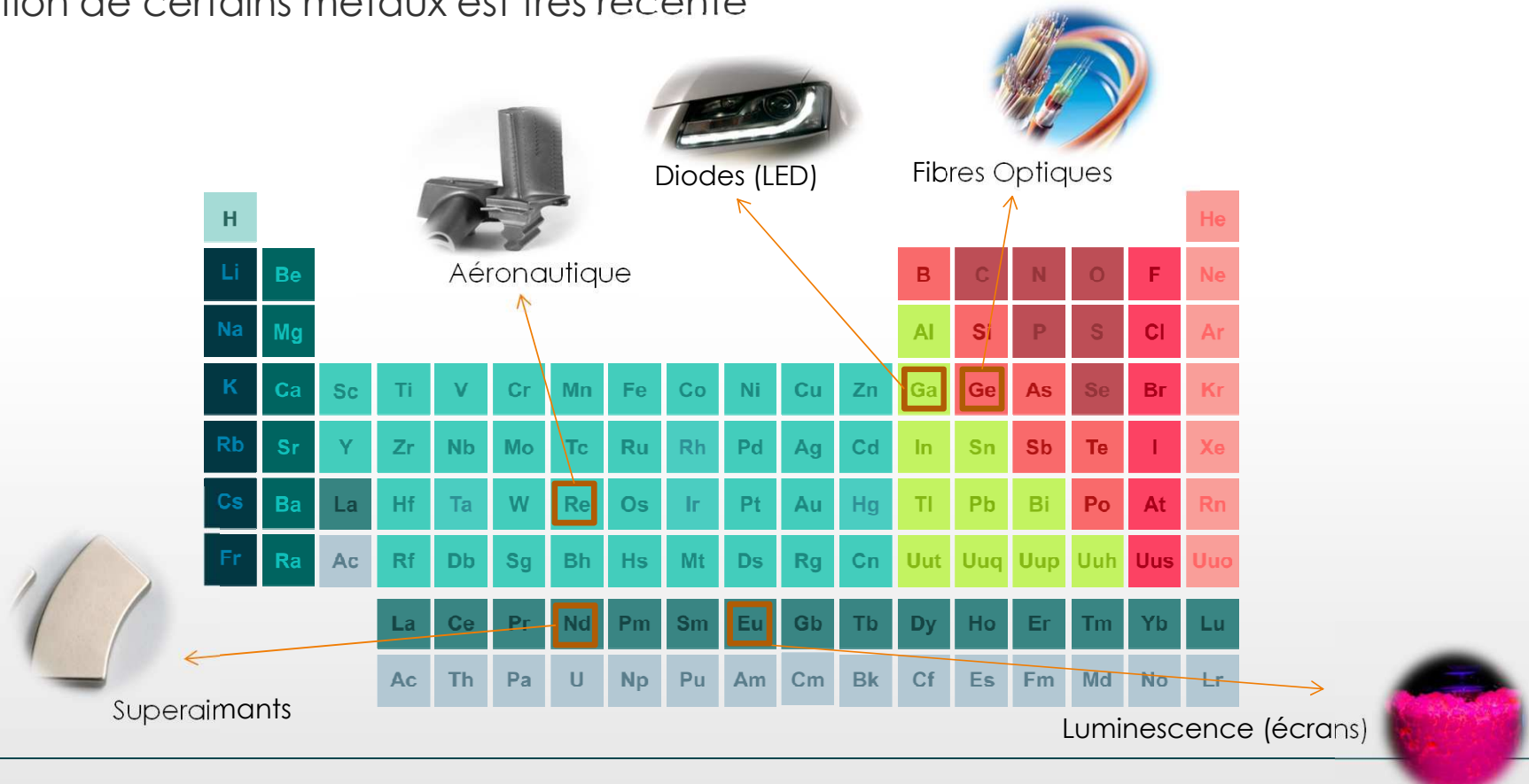
Penser le cycle

- Les quatre défis de l'économie circulaire



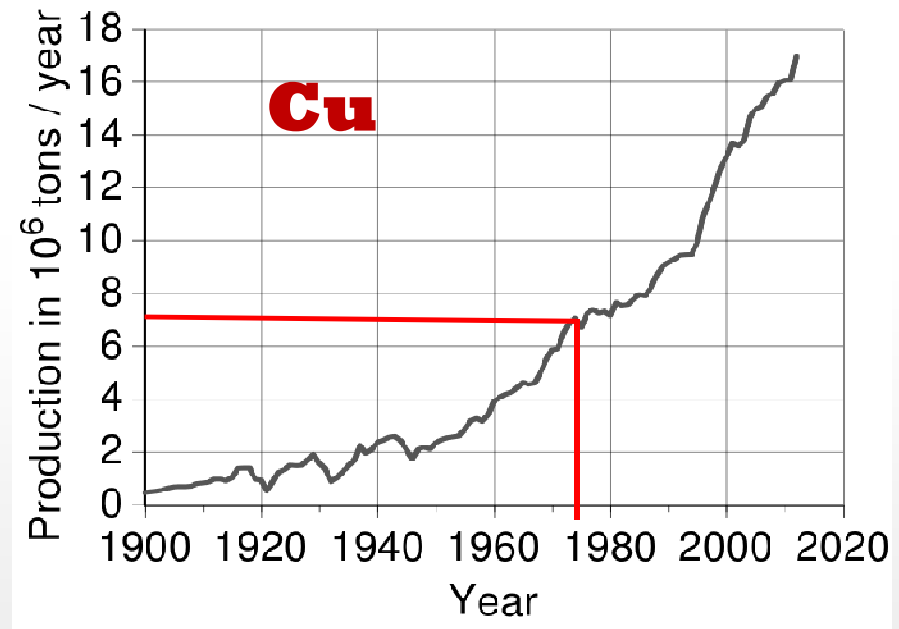
Défi 1 : FEED the loop

- L'utilisation de certains métaux est très récente



Défi 1 : FEED the loop

- Le recyclage, même parfait est insuffisant pour nos besoins



Défi 1 : FEED the loop

- Gigantisme et Automatisation

- Teneurs ↘ ↘

- Tonnages ↗ ↗

- Mine souterraine

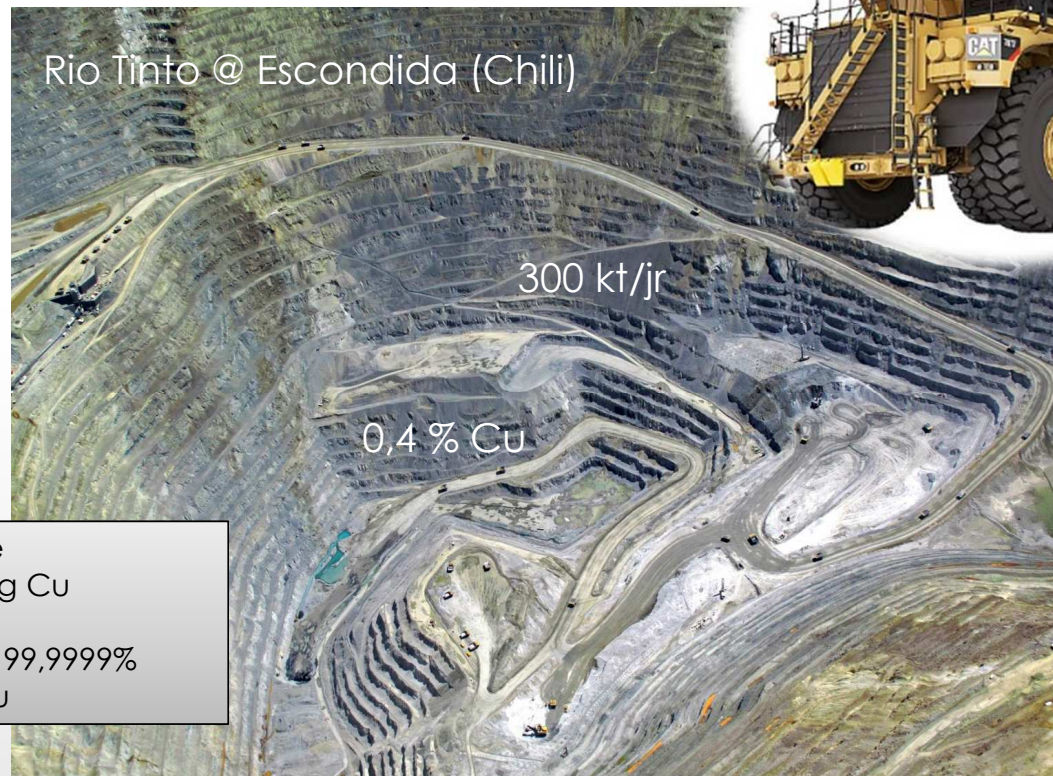
- Profondeur ↗ ↗

- Mine Invisible

- Robotisée

Energie grise
➤ 100 MJ/kg Cu

Valeur Cu à 99,99999%
➤ 5 €/kg Cu



300 tonnes

Défi 1 : FEED the loop

- Minimisation de l'impact environnemental
 - Analyse du cycle de vie



NORILSK (RUS) 1,5% Ni

Sulfures de Ni
Mine souterraine
Cercle arctique
Pyrométallurgie

TIEBAGHI (N CAL) 1,5% Ni

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



Défi 1 : FEED the loop

- 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

Défi 1 : FEED the loop

- (R)ouvrir des mines en Europe ?
 - Circuit court!
 - Internalisation de l'impact (CO₂)
 - Acceptabilité sociale... nulle!

Exploiter les fonds océaniques ?

- Environnement vierge
- Ressources limitées
- International Seabed Agency (ISA)



Mine de Zinc de Lisheen (IRL)



(GSR (Groupe DEME) Patania, 2017)

Défi 2 : DESIGN the loop

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



» 89% Cu, 5% Al, 5% Zn, 1% Sn

Défi 2 : DESIGN the loop

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



Défi 2 : DESIGN the loop

- Minimiser l'énergie de fabrication et de recyclage
- Repenser notre design
 - Simplicité des assemblages
 - Design for disassembling
 - ...



Défi 3 : SLOW DOWN the loop

- Fabriquer pour DURER
 - Design for repair/dissassembling
 - Encourager la garantie prolongée
 - Right to Repair



PuzzlePhone

Upgradeable
Sustainable
Incredible

**Made in Finland.
Made to last.**

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 3 : SLOW DOWN the loop

- En finir avec la génération BIC
 - Proscrire l'usage unique!



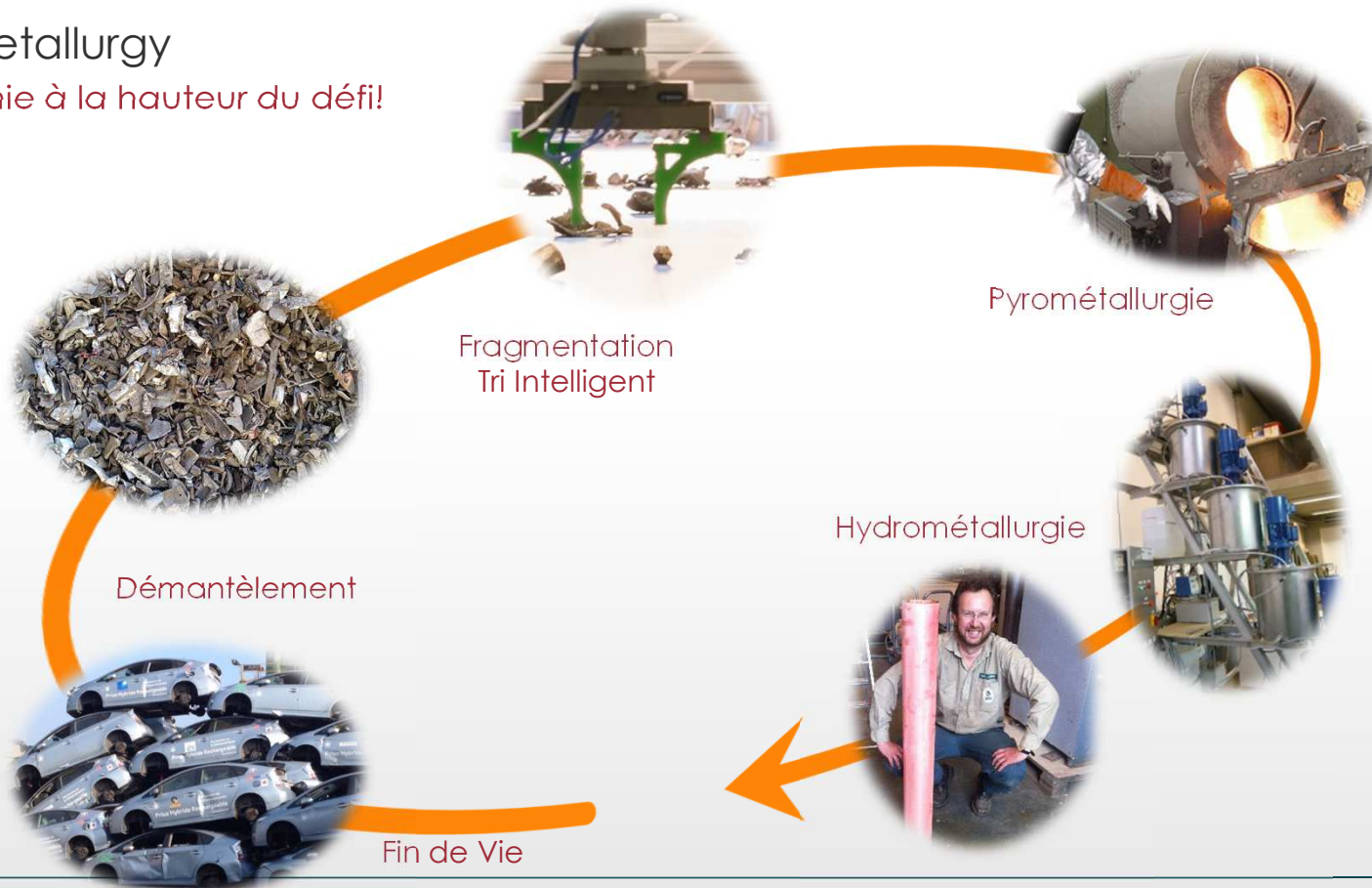
Défi 3 : SLOW DOWN the loop

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

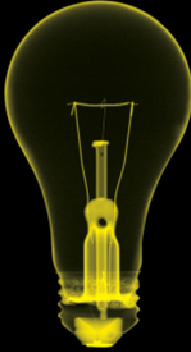

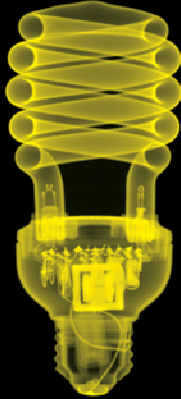



Défi 4 : CLOSE the loop

- Reverse Metallurgy
 - La Wallonie à la hauteur du défi!



C.Q.F.D ?

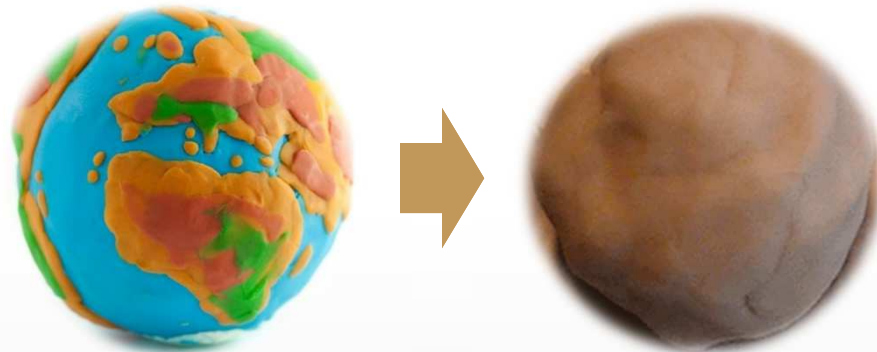
| <i>Incandescent</i> | <i>Halogene</i> | <i>Fluo-compact</i> | <i>LED</i> |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| <i>12-20 lm/W</i> | <i>18-25 lm/W</i> | <i>60-80 lm/W</i> | <i>25-140 lm/W</i> |
| Tungsten Glass,... | Tungsten Iodine, Bromine, ... Glass,... | Tungsten Mercury, Rare Earths, ... Glass, Plastics,... | 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.

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