



La quadrature de l'économie circulaire des matériaux

Eric PIRARD

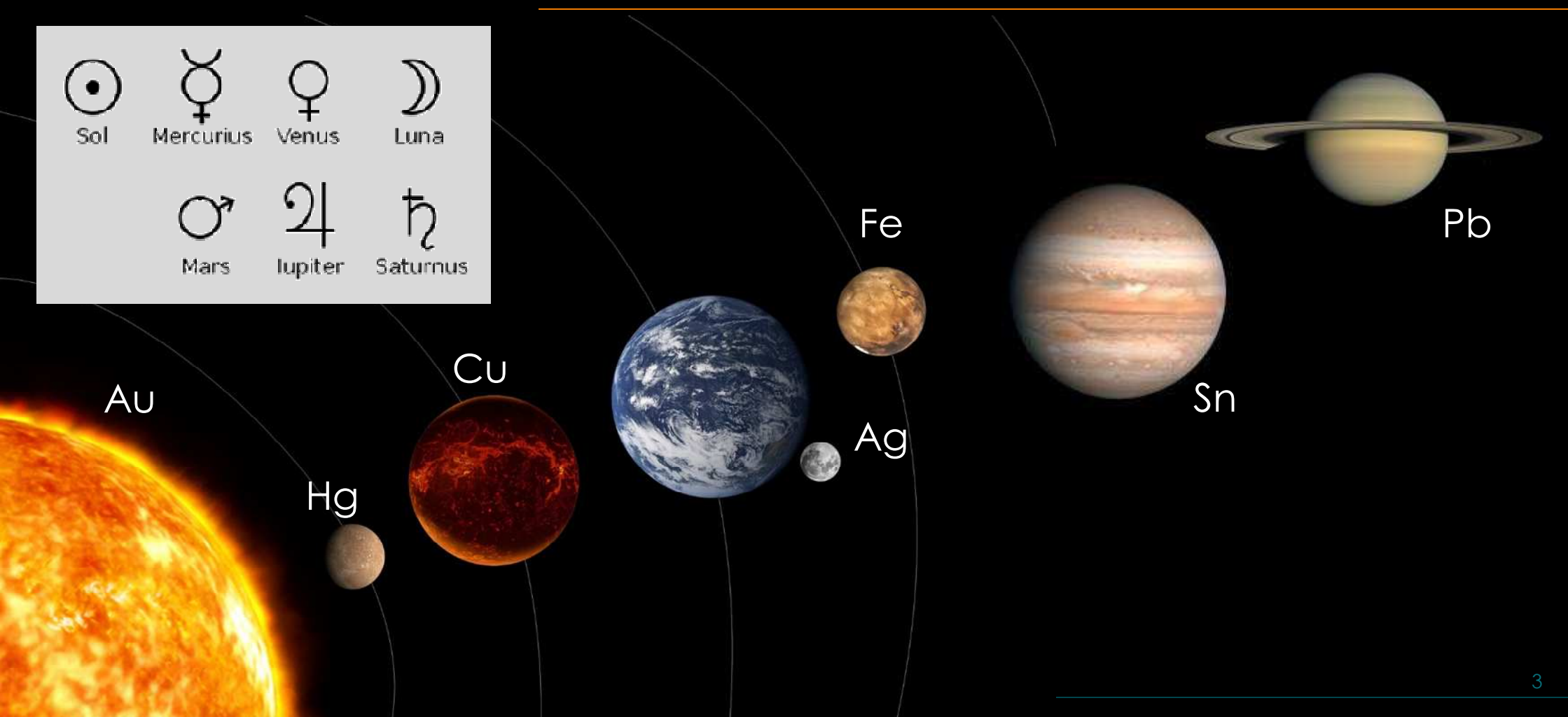
Connaissance et Vie d'Aujourd'hui – Bruxelles - 21 Janvier 2020

*... 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)

Les SEPT métaux de l'Antiquité



La fin d'un inventaire

118 éléments – 91 métaux

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	-71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	-103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

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

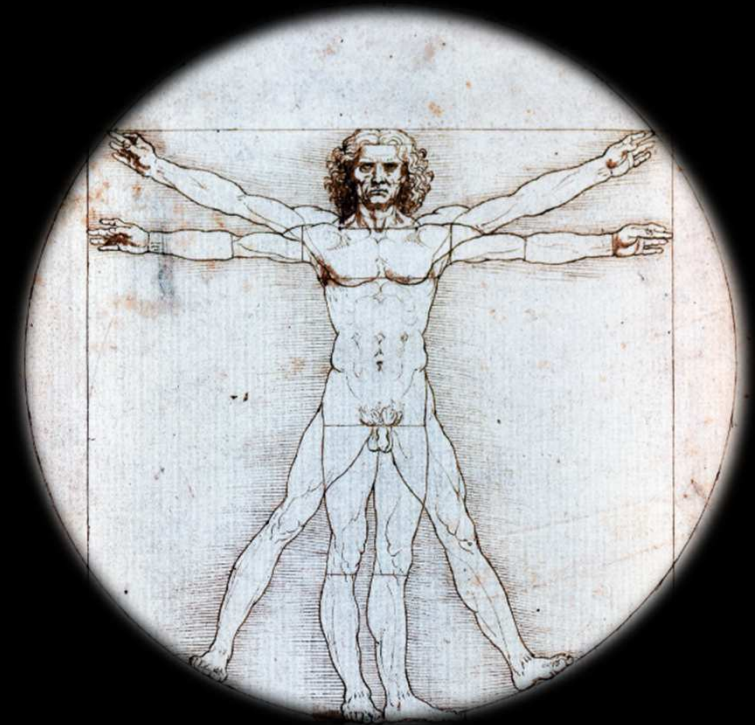
 Known in antiquity	 aka Seaborg published his periodic table (1945)
 aka known when (alw) Lavoisier published his list of elements (1789)	 as to know (ak) upto 2000
 aka Mendeleev published his periodic table (1869)	 aka 2012
 aka Dering published his periodic table (1923)	

Tout est chimie

- De quoi s'agit-il?

- O – Oxygène - 65 %
- C - Carbone - 18 %
- H- Hydrogène - 10 %
- N – Azote - 3 %
- Ca – Calcium - 1,4 %
- P – Phosphore - 1,1 %

- *Indice : Il est capable du meilleur comme du pire...*



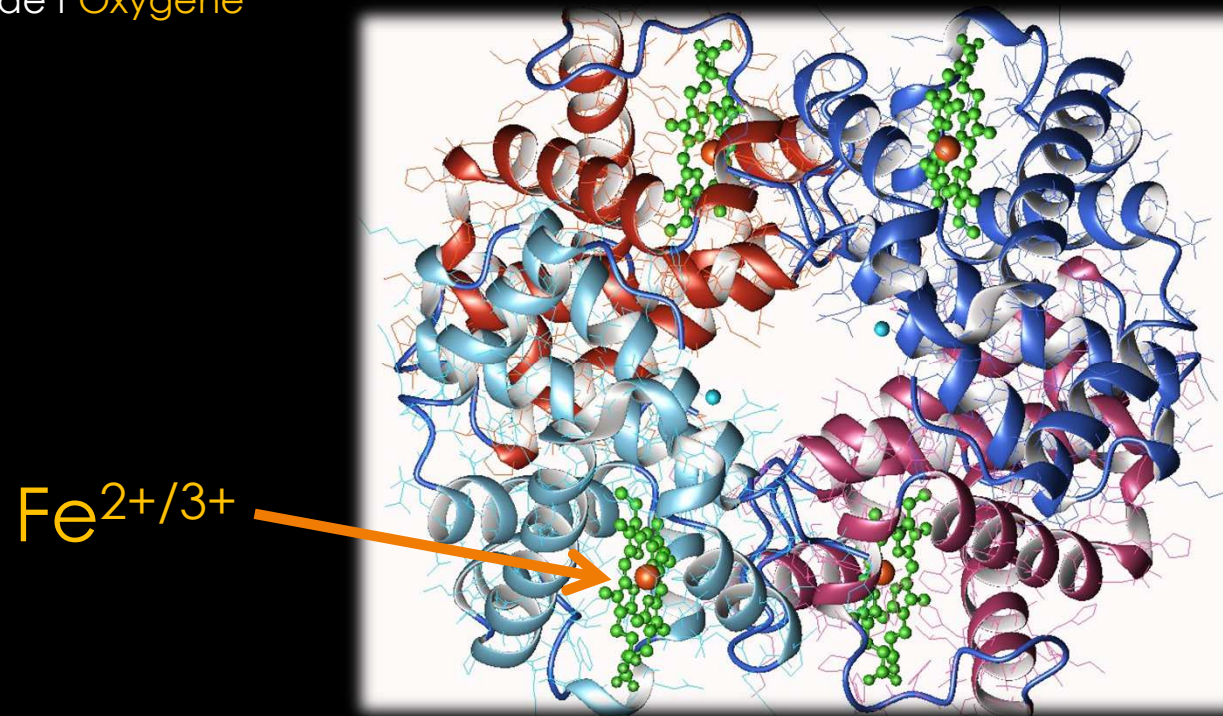
Je suis chimie

- La base moléculaire (nucléotides) de notre ADN
 - Adénine $C_5H_5N_5$
 - Thymine $C_5H_6N_2O_2$
 - Cytosine $C_4H_5N_3O$
 - Guanine $C_5H_5N_5O$



Une santé de fer

- Hémoglobine
 - Piégeage / Libération de l'Oxygène



Mémoires d'Atome

Une histoire sidérante!

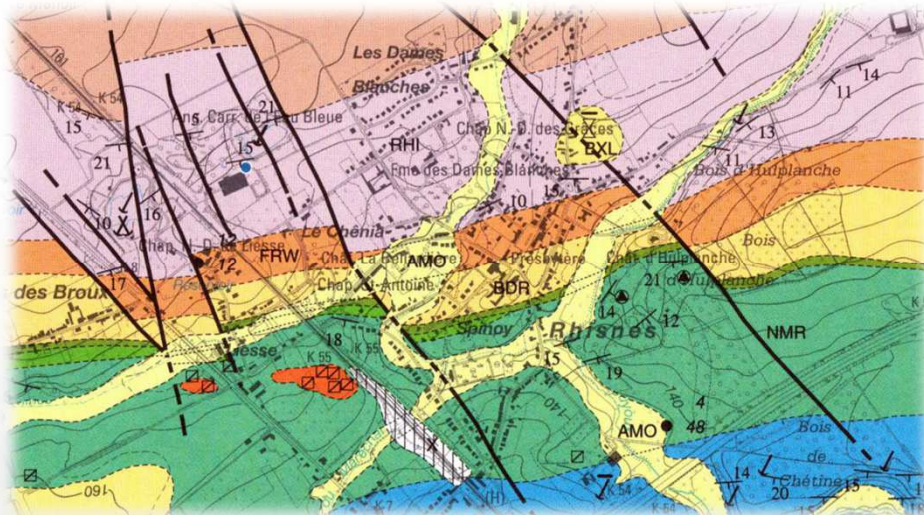
Une histoire sidérante!

- Quelques épinards...



Une histoire sidérante!

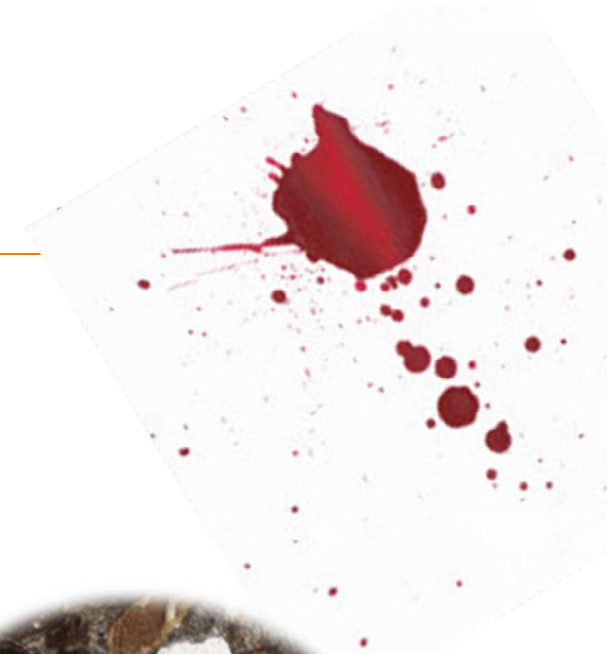
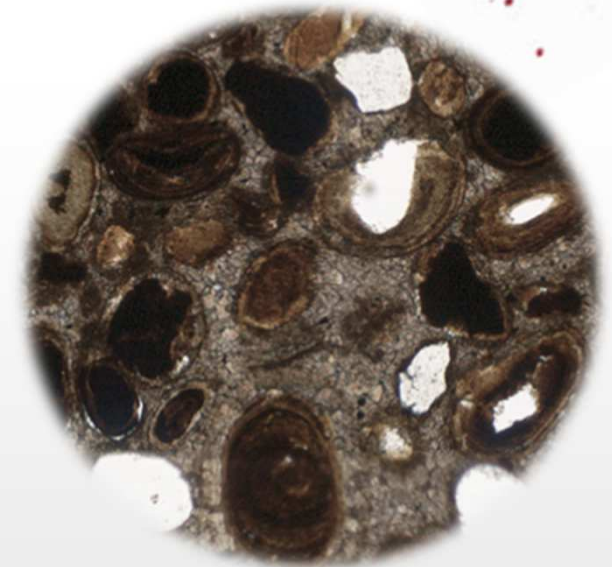
- ... poussant sur le sol de Rhisnes



Oligite Oolithique du Famennien

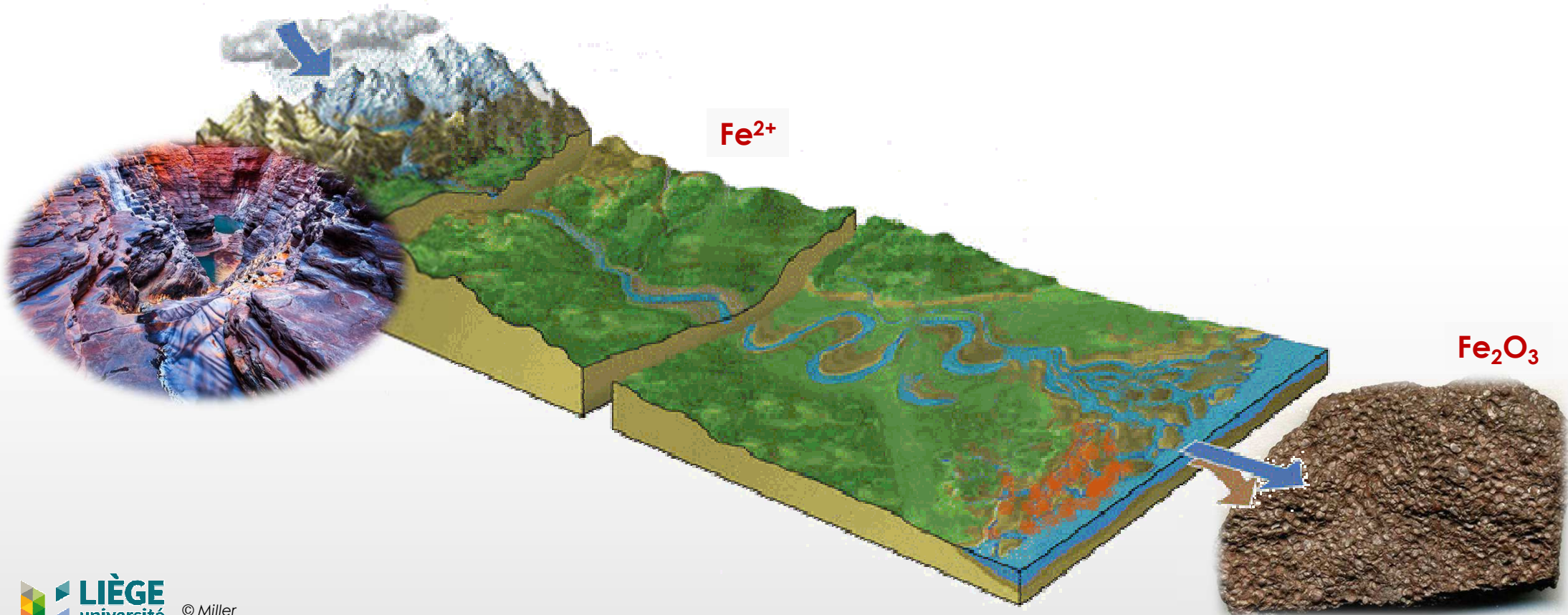
Une histoire sidérante!

- ... qui fut un jour une plage tropicale
 - La Wallonie il y a 350 millions d'années



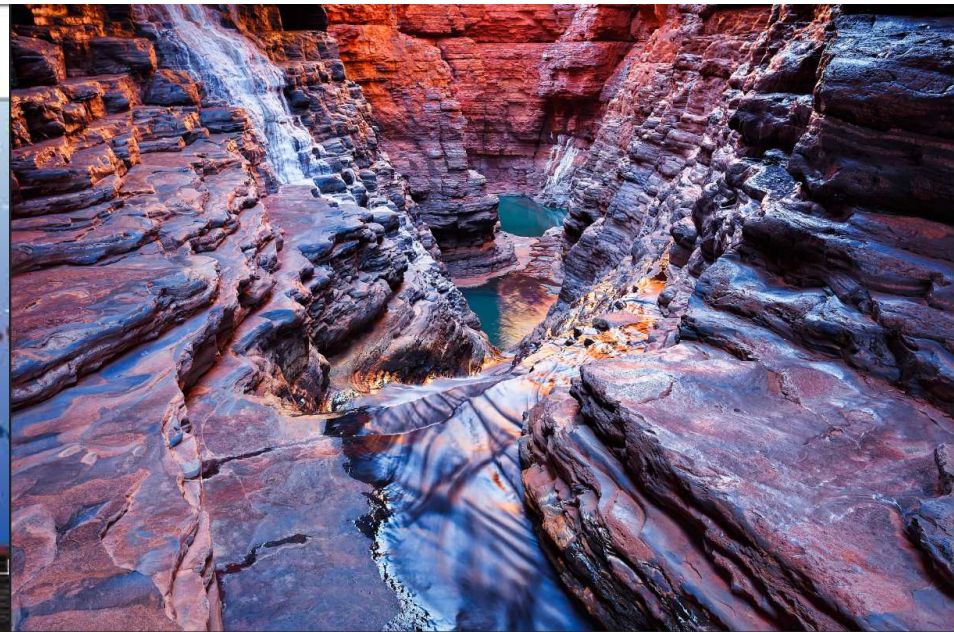
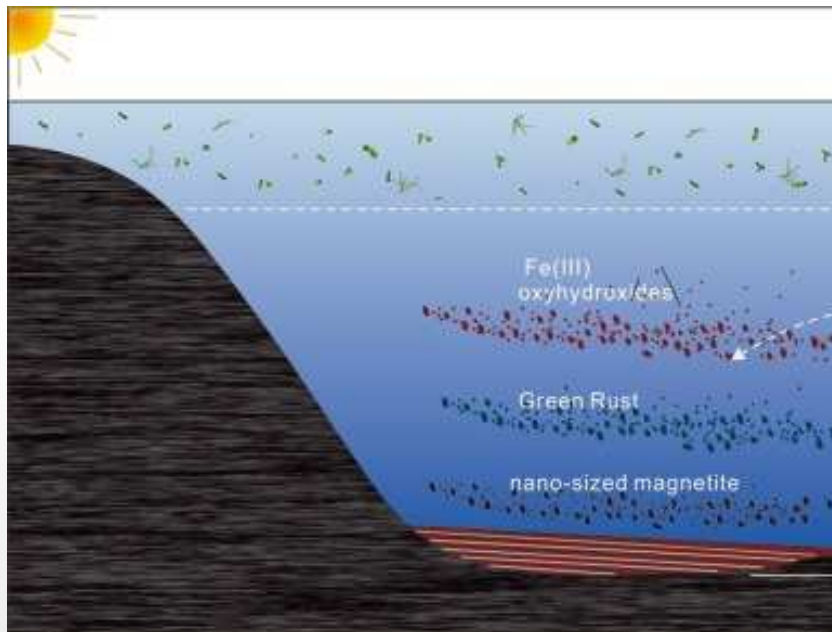
Une histoire sidérante!

- ... résultant de l'érosion de massifs rocheux



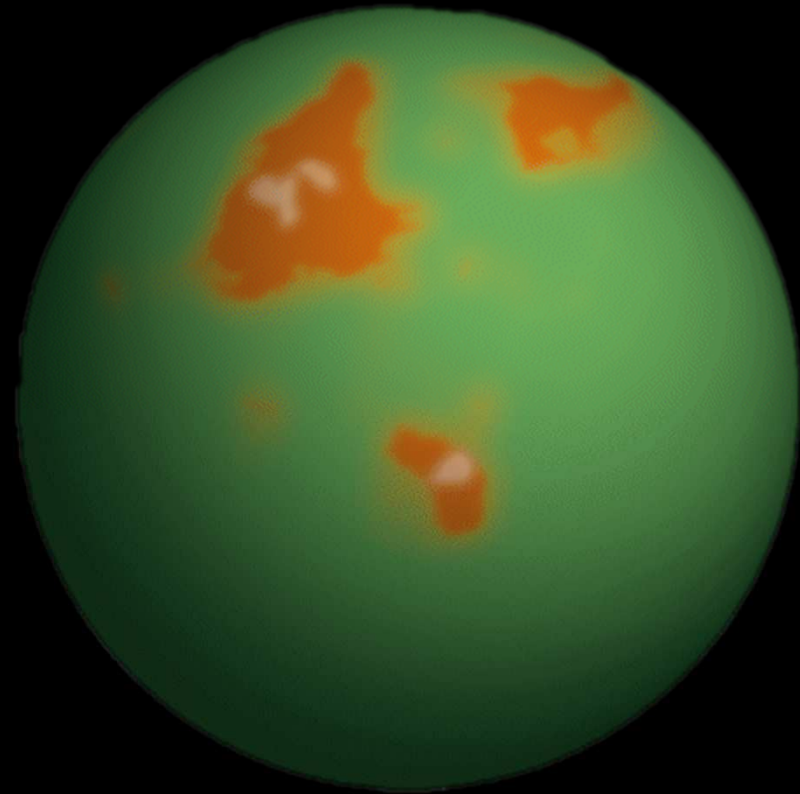
Une histoire sidérante!

- ... contenant des couches de « fer rubané »
 - Précipitation massive d'oxydes fer sur le fond de l'océan il y a 2,5 milliards d'années (2,5 Ga)



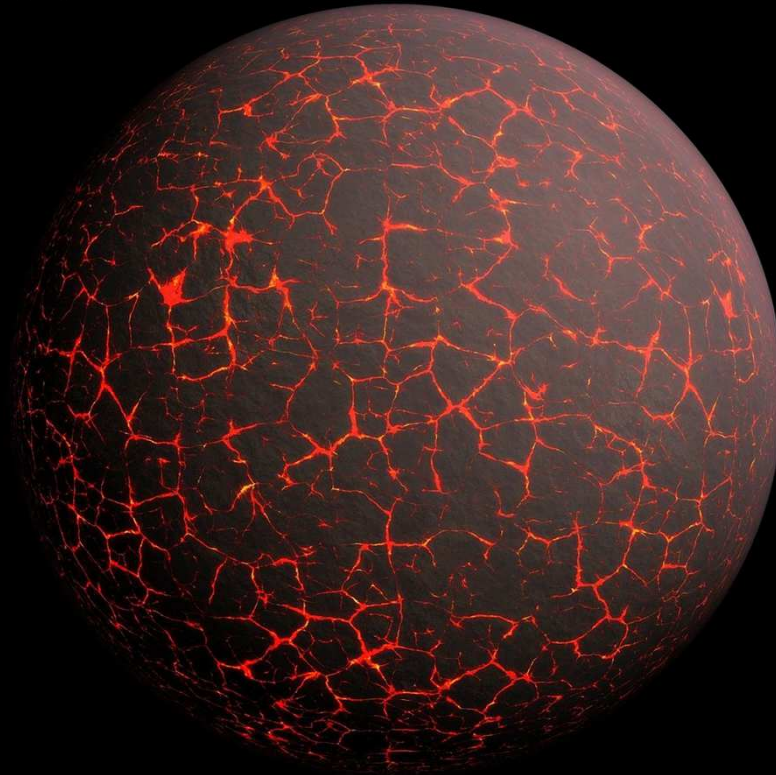
Une histoire sidérante!

- Un fer dissout dans un océan à 60°C
 - Il y a 3 milliards d'années



Une histoire sidérante!

- Un fer abondant dans un nouvel objet astral
 - Il y a 4,5 milliards d'années





Le **fer** dans l'hémoglobine de votre **main droite**
provient d'une étoile qui a explosé il y a 8 milliards d'années ...

Le **fer** de votre **main gauche** provient d'une autre étoile.

*Dr. Jill Tarter
Astronomer, SETI Project
U California*

L'épopée sidérurgique

Il faut le fer...

L'épopée sidérurgique

- Préhistoire
 - Ogres Naturels : Hématite Fe_2O_3 et Goethite $\text{Fe}(\text{OH})_3$



Rustrel - Colorado Provençal



« Terre de Sienne » brûlée

L'épopée sidérurgique

- Antiquité
 - Fer météoritique



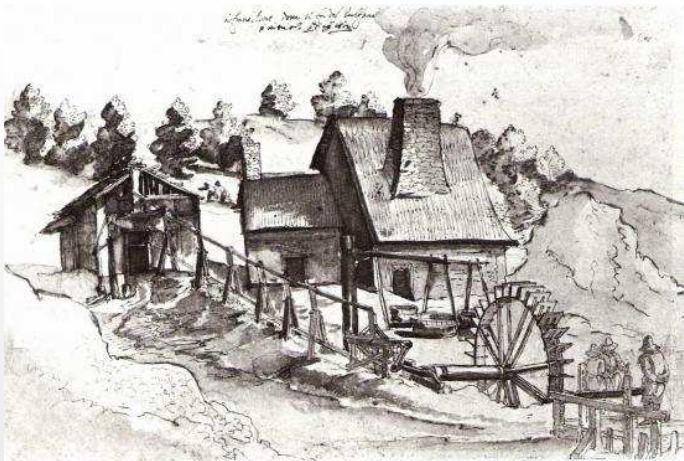
Dague de Toutânkhamon (1330 BC)



Hiéroglyphe signifiant « fer du ciel »

L'épopée sidérurgique

- Forgerons et Alchimistes
 - Extraction des minerais (*avant terme*)
 - Perfection dans le foyer (*matrice*)
- L'Homme collabore à l'œuvre de la Nature
 - Et se substitue au temps!



Maka © MMIL



Gonrieux, 1693 © MMIL

L'épopée sidérurgique

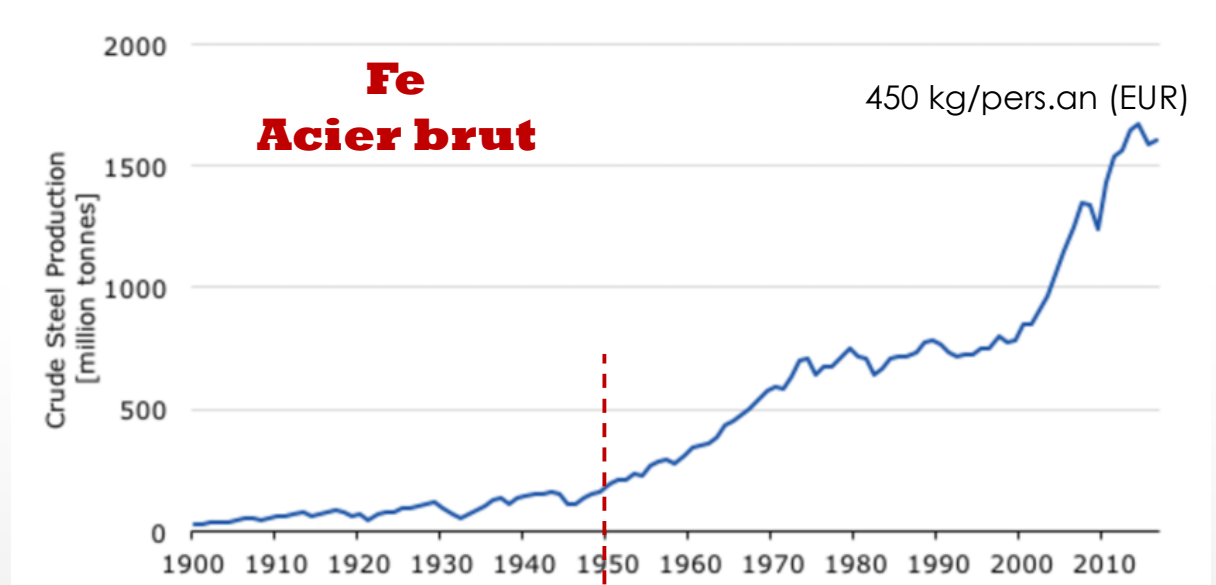
- Révolution industrielle
 - Des rêves de croissance ...



Locomotive Cockerill T 12 (1939)

L'épopée sidérurgique

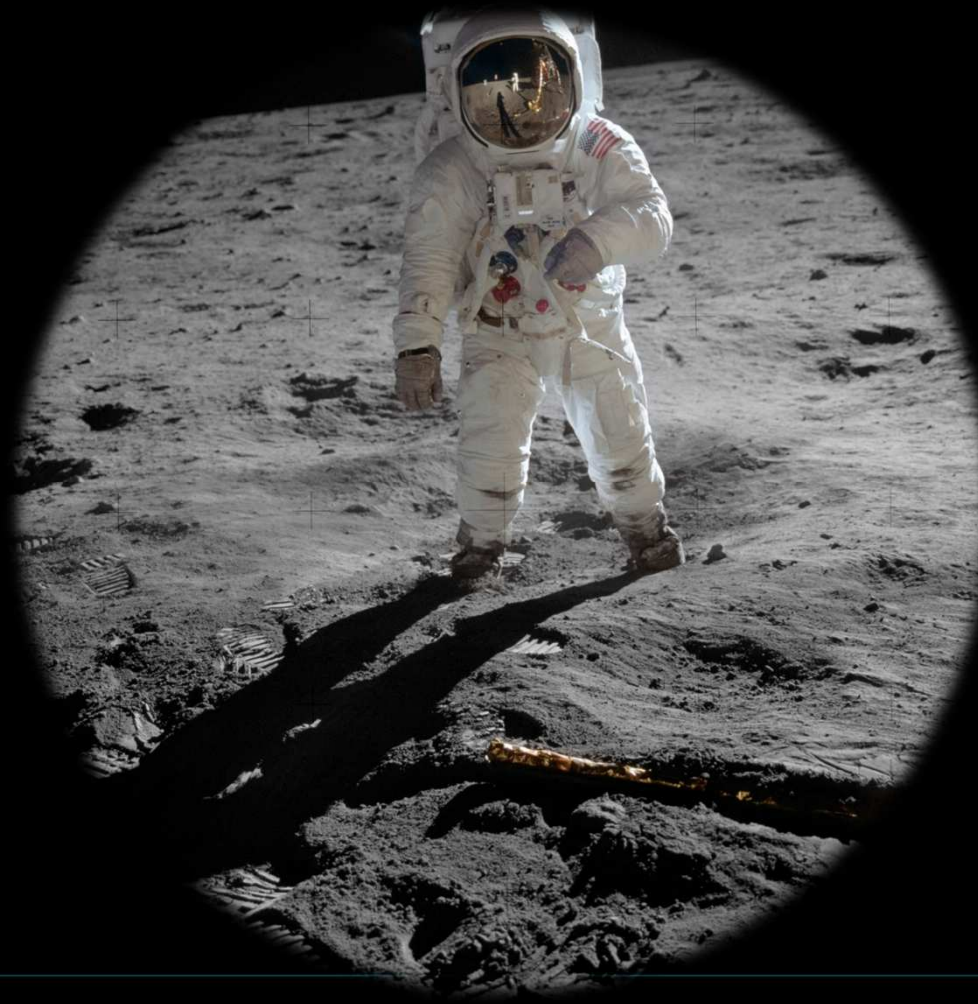
- Toujours de croissance...



Fin de l'Holocène
de -11 500 à 1949

Début de l' Anthropocène ?
refusé par l'IUGS
Assoc Int. Sciences Géologiques

Sans limites?

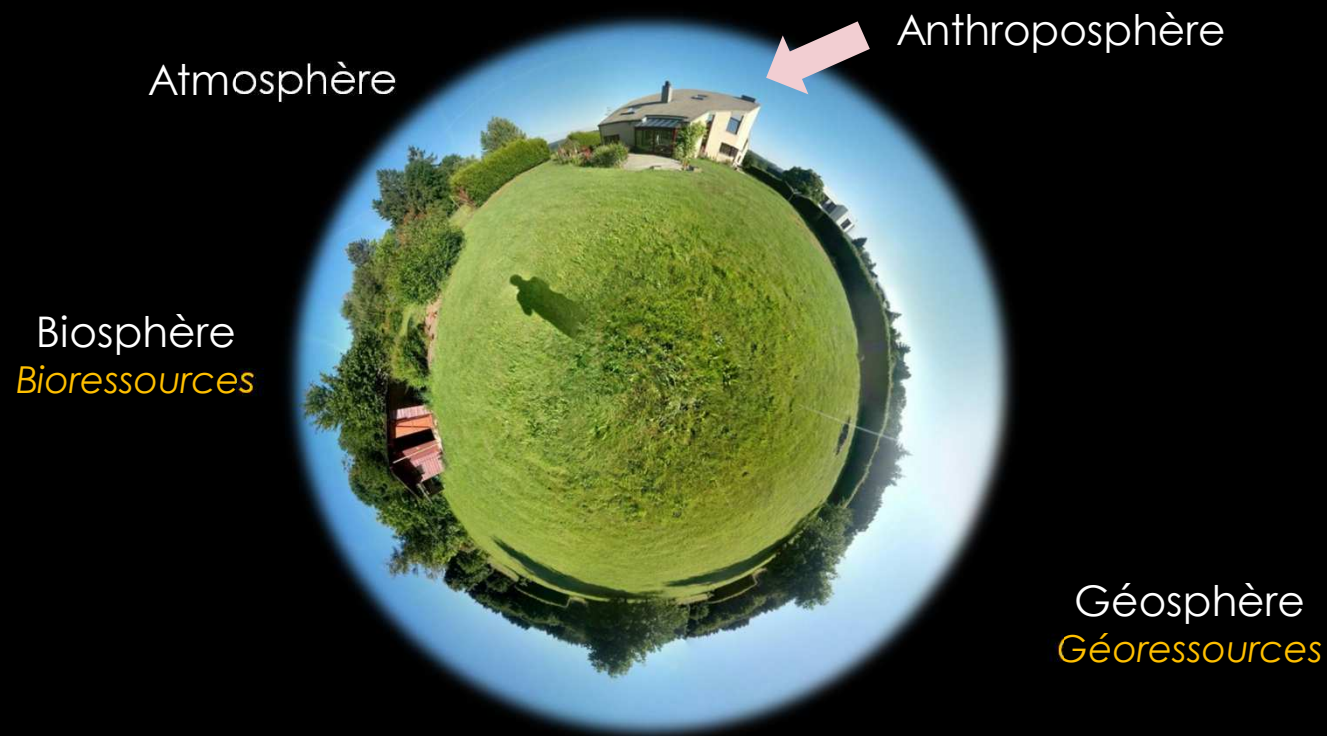


Sans limites?



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

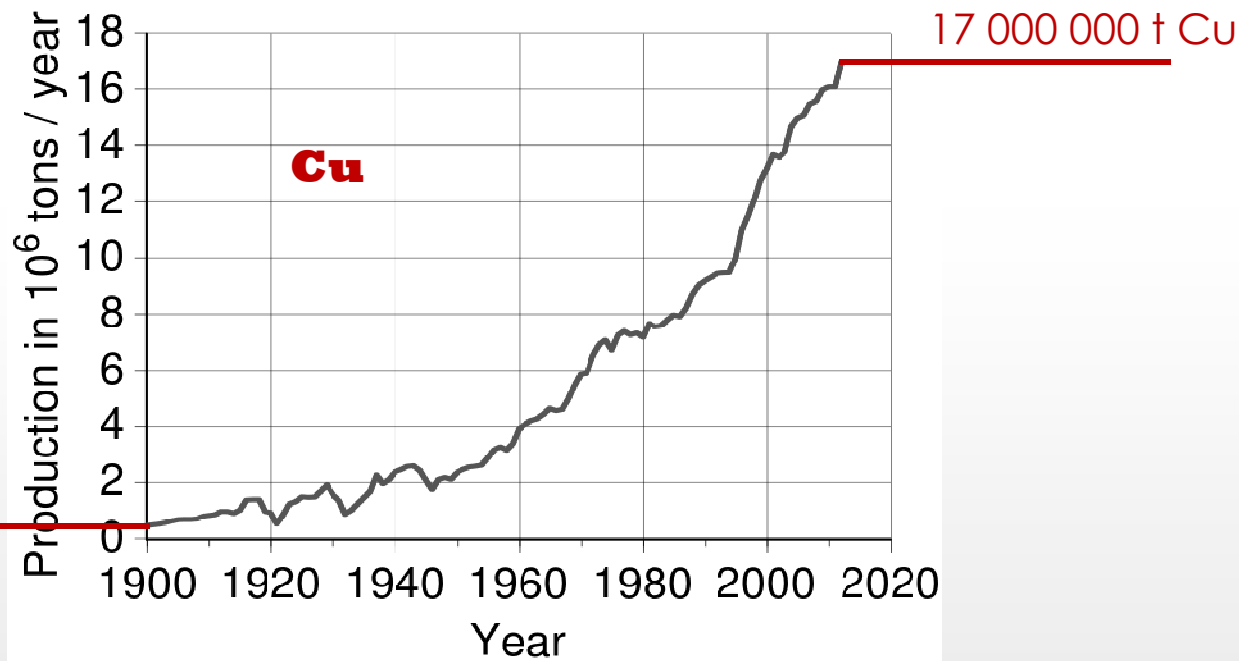


Croissance de l'Anthroposphère

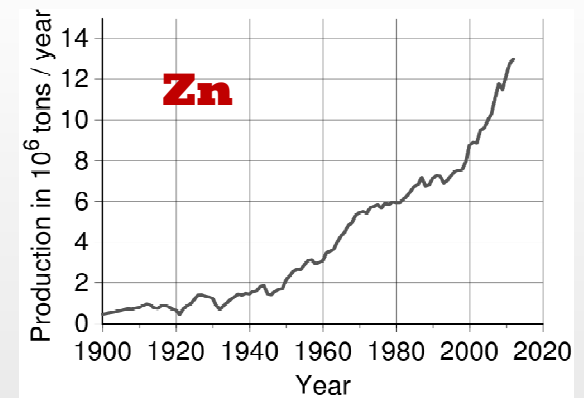
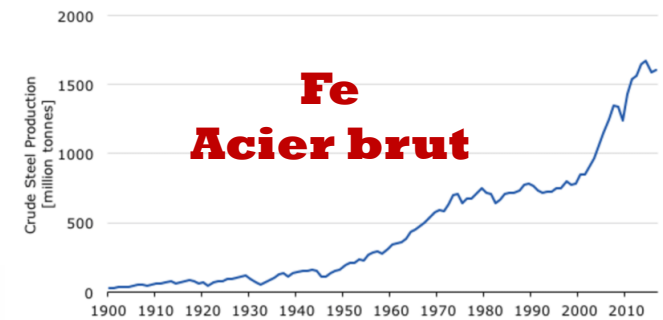
Des Ressources et des Hommes

Un siècle d'extractivisme!

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

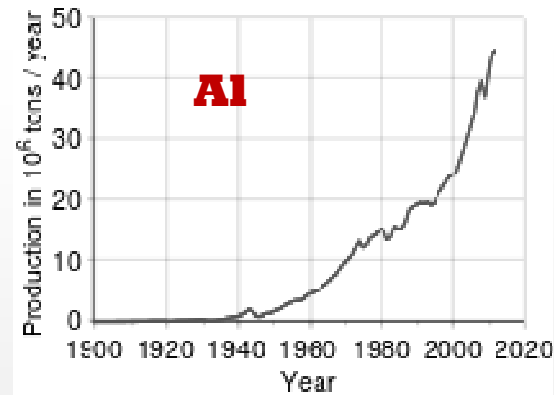
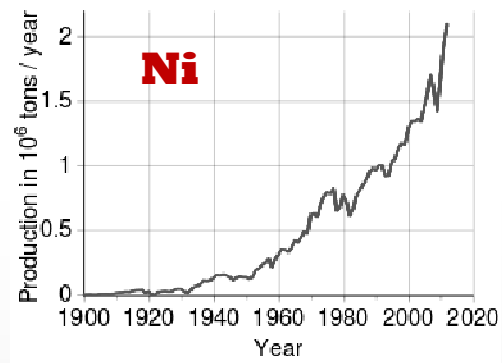


Consommation mondiale de cuivre 1900-2016



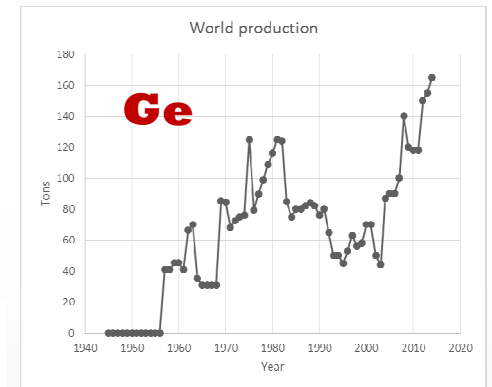
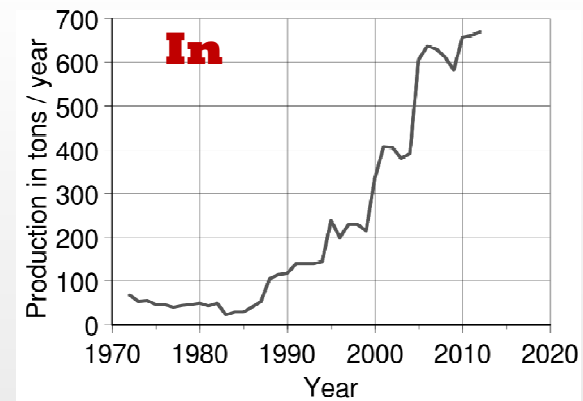
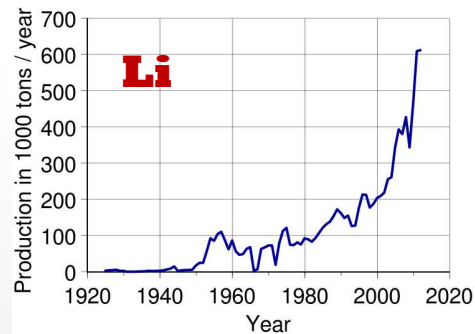
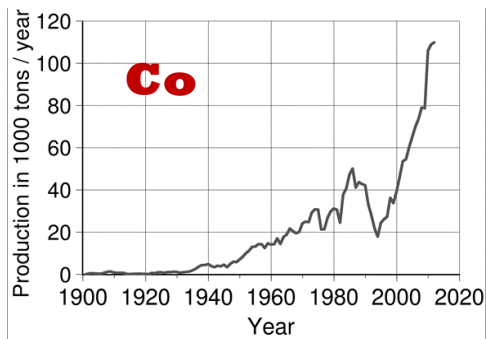
Un siècle d'extractivisme!

- Métaux modernes



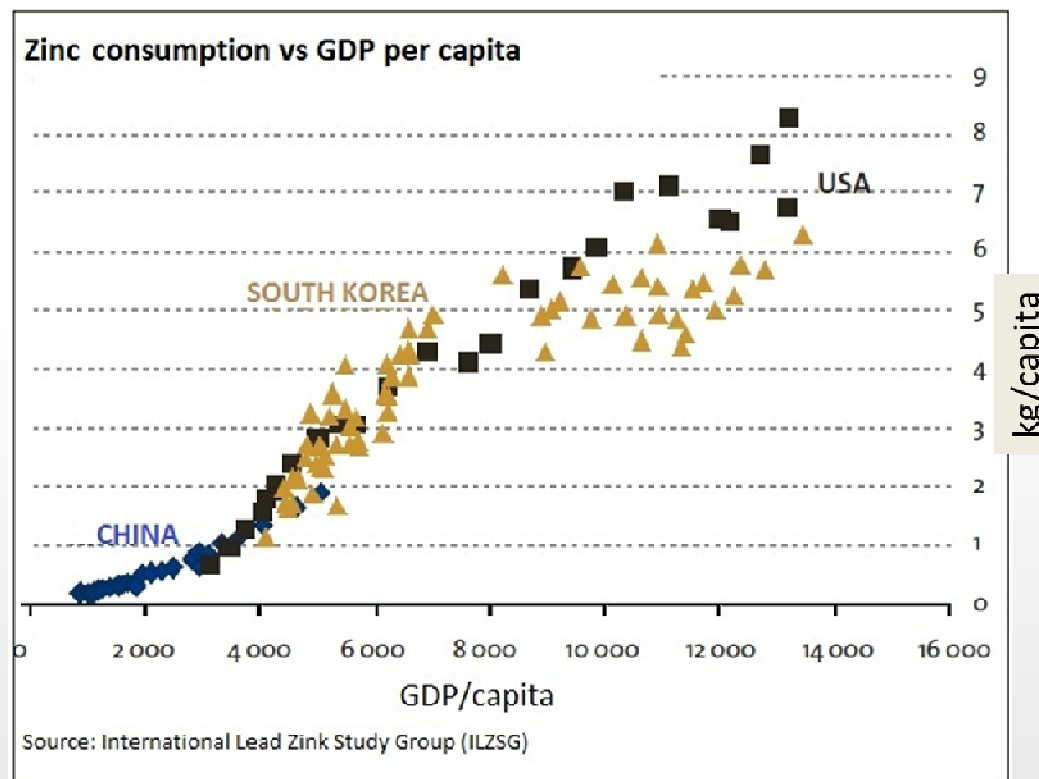
Un siècle d'extractivisme!

- Métaux technologiques



Un siècle d'extractivisme!

- Il faut découpler croissance et ressources
 - Dématérialiser!



Dématérialisation ?

- Une tendance à la TECHNOBÉSITÉ...



De 600 kg à 1200 kg

Dématérialisation ?

- Des besoins énormes pour la transition énergétique

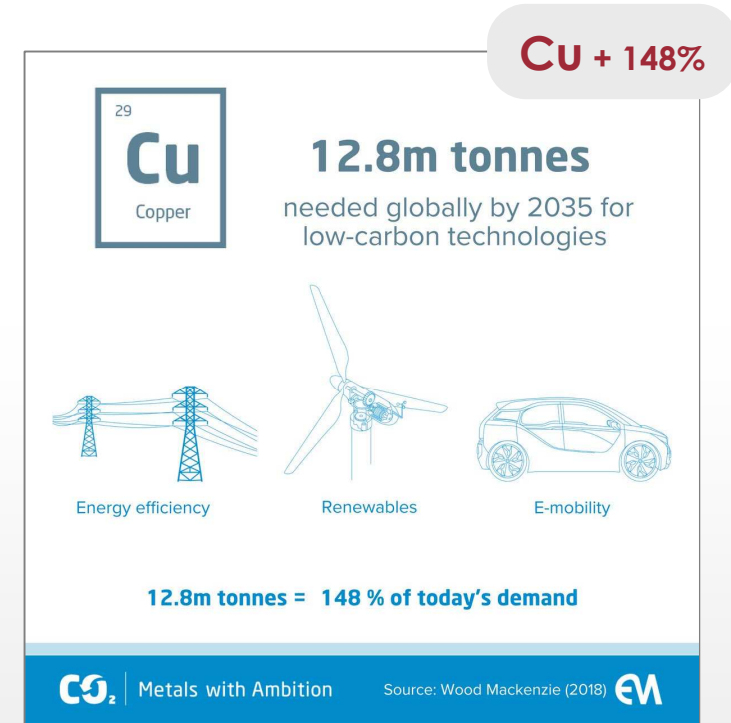


Objectif 30% EV en 2030

Co + 400%

Ni + 56%

CU + 20%



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

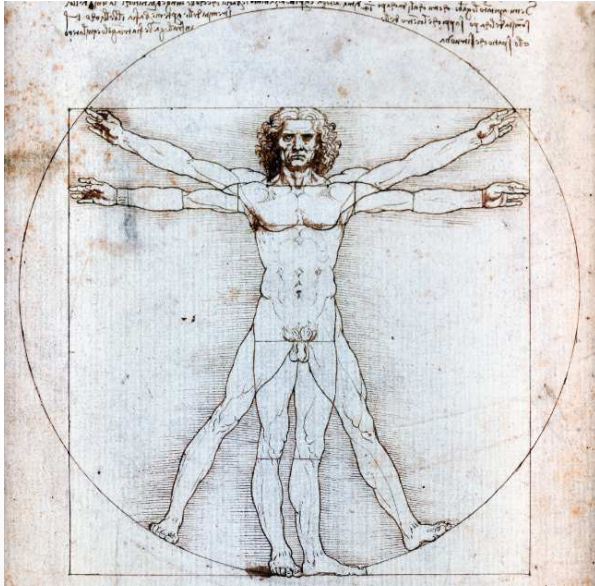
Génération BIC

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

- L'utilisation de certains métaux est très récente

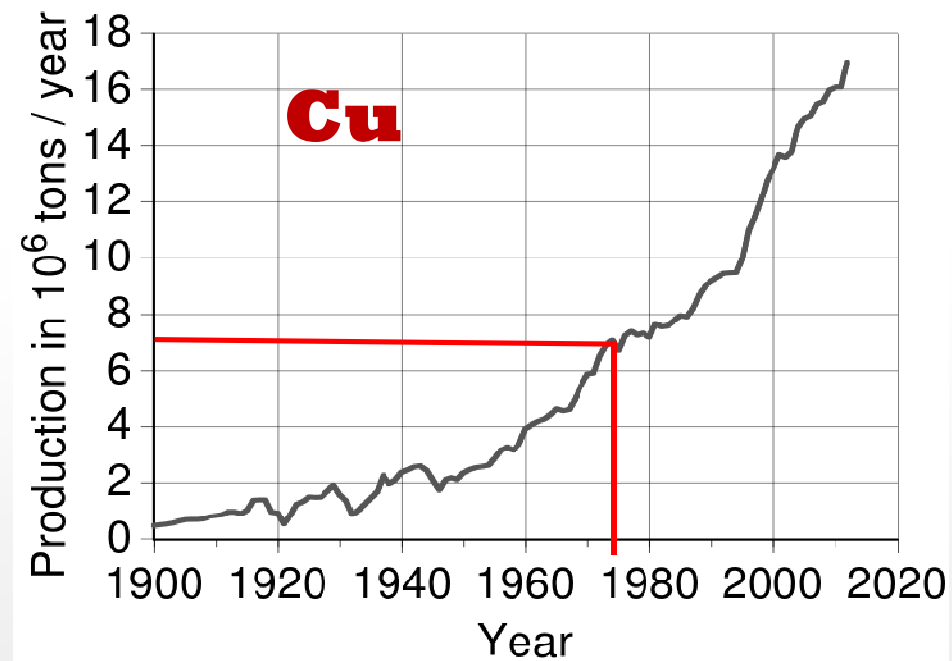
The diagram shows a periodic table with several elements highlighted in orange boxes and arrows pointing to their respective applications:

- Aéronautique:** Arrows point to Rhenium (Re), Titanium (Ti), and Aluminum (Al).
- Diodes (LED):** Arrows point to Gallium (Ga) and Germanium (Ge).
- Fibres Optiques:** An arrow points to Silicon (Si).
- Superaimants:** Arrows point to Neodymium (Nd), Samarium (Sm), and Europium (Eu).
- Luminescence (écrans):** An arrow points to Europium (Eu).

H																			He	
Li	Be																			Ne
Na	Mg																			Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr			
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe			
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo			
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

Défi 1 : FEED the loop

- Le recyclage, même parfait est insuffisant pour nos besoins



Défi 1 : FEED the loop

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

Exploiter les fonds océaniques ?

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



Mine de Zinc de Lisheen (IRL)



(GSR (Groupe DEMA) 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.**

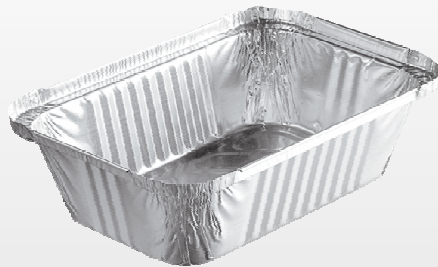
Défi 3 : SLOW DOWN the loop

- 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!



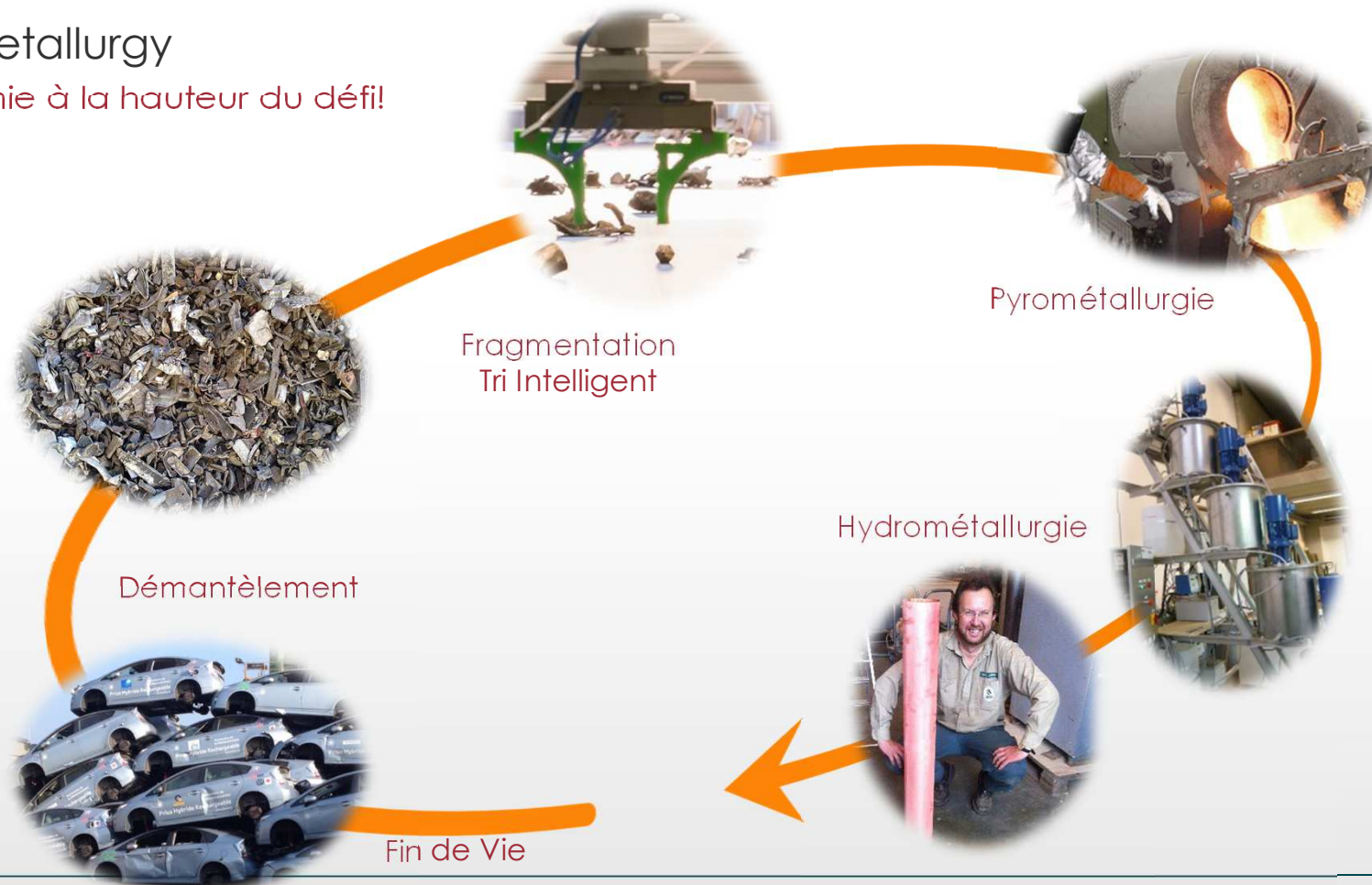
Défi 3 : SLOW DOWN the loop

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!



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

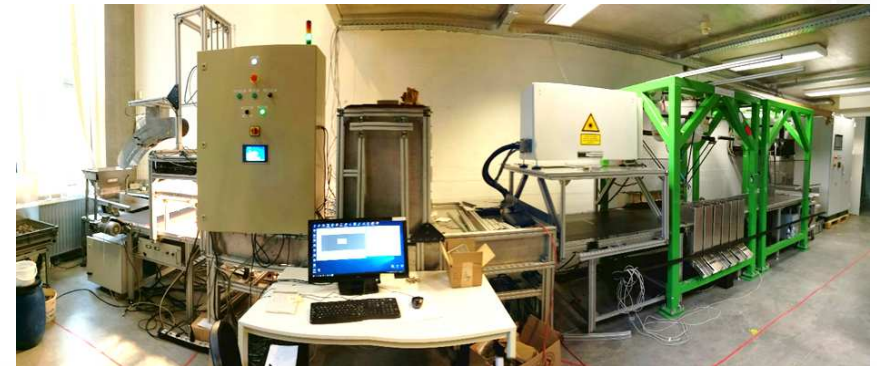


*Démantèlement
Hydrométallurgie*

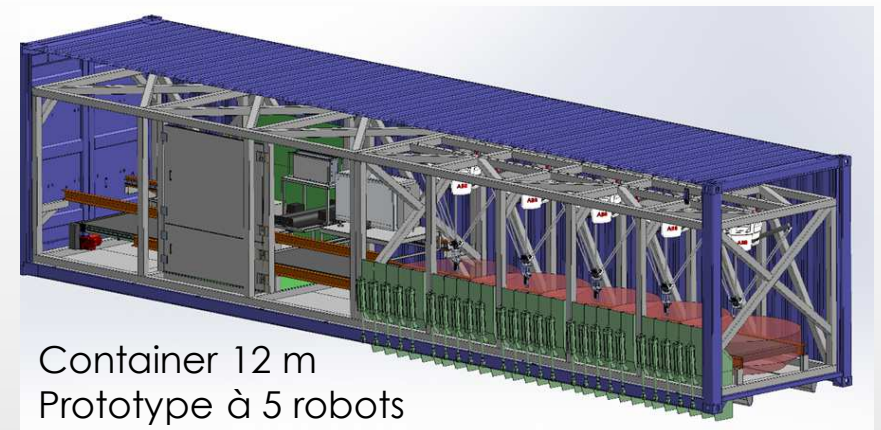
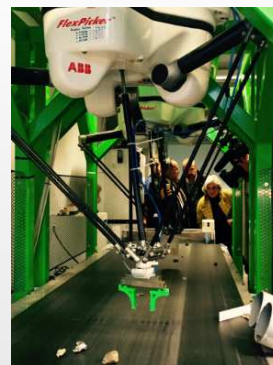
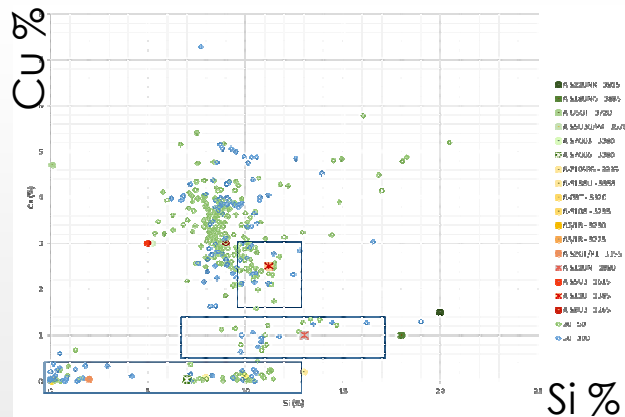
Tri Intelligent des Alliages-AI



- 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



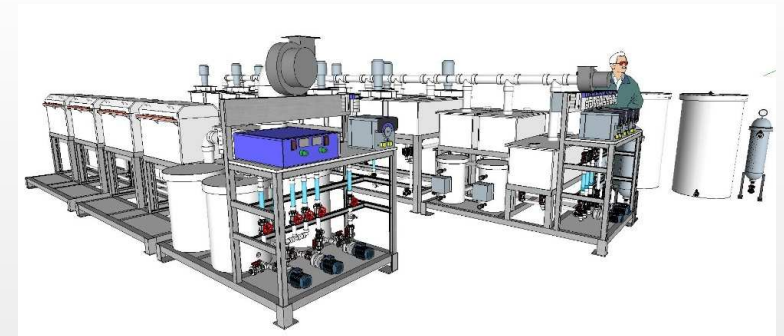
- Récupération du cuivre par dissolution des phases cuprifères complexes



Installation pilote d'hydrométallurgie
@ULiege

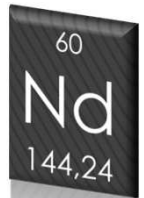


Lixiviation, extraction par solvants et électrolyse pour obtenir un Cuivre cathodique à 99,98%.
@ULiege



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

Récupération Sélective des Terres Rares



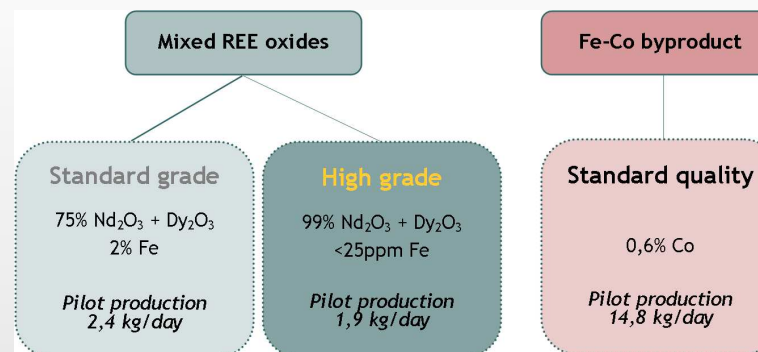
- Démantèlement manuel des superaimants
 - 1,2 kg de REE dans les segments de rotor du moteur électrique



Démantèlement manuel et récupération des aimants NdFeB après démagnétisation thermique



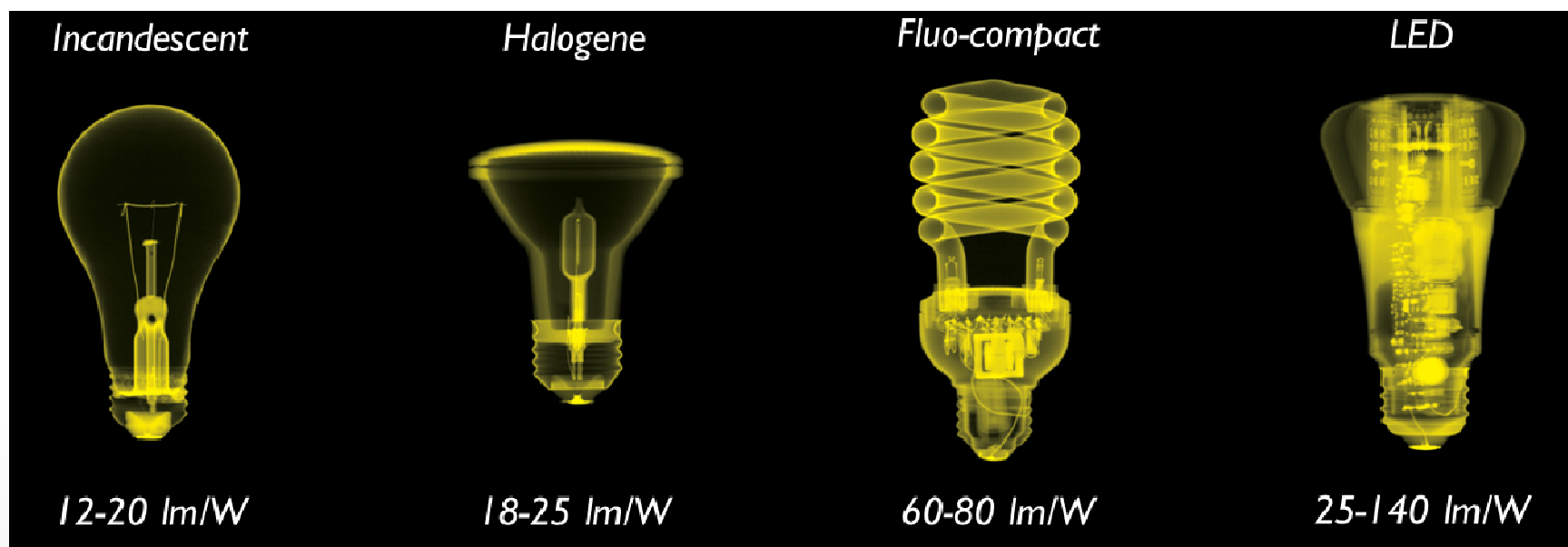
- Métallurgie extractive du Nd
 - 4 étapes à basse T° ($< 80^\circ$)
 - 95 % récupération
 - Mix REO & coproduit Fe-Co



Une histoire éclairante

... d'Edison à Nakamura

Une histoire éclairante



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