

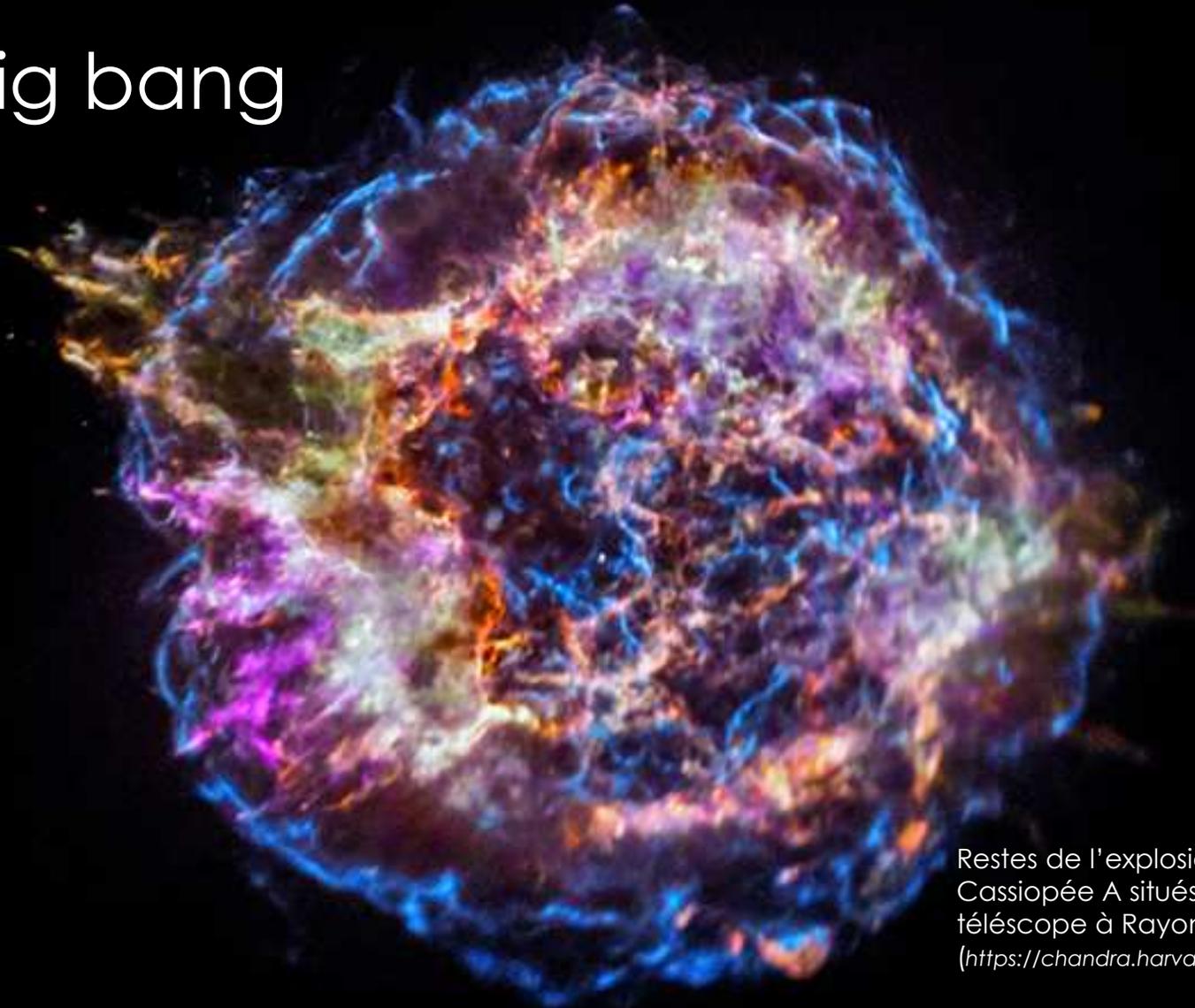


Métaux et Transition Énergétique

des métaux gris pour une énergie verte

Eric PIRARD

Little big bang



Restes de l'explosion de la Supernova
Cassiopee A situés à 11 000 AL vus par le
téléscope à Rayons X Chandra
(https://chandra.harvard.edu/photo/2017/casa_life)

Little big bang

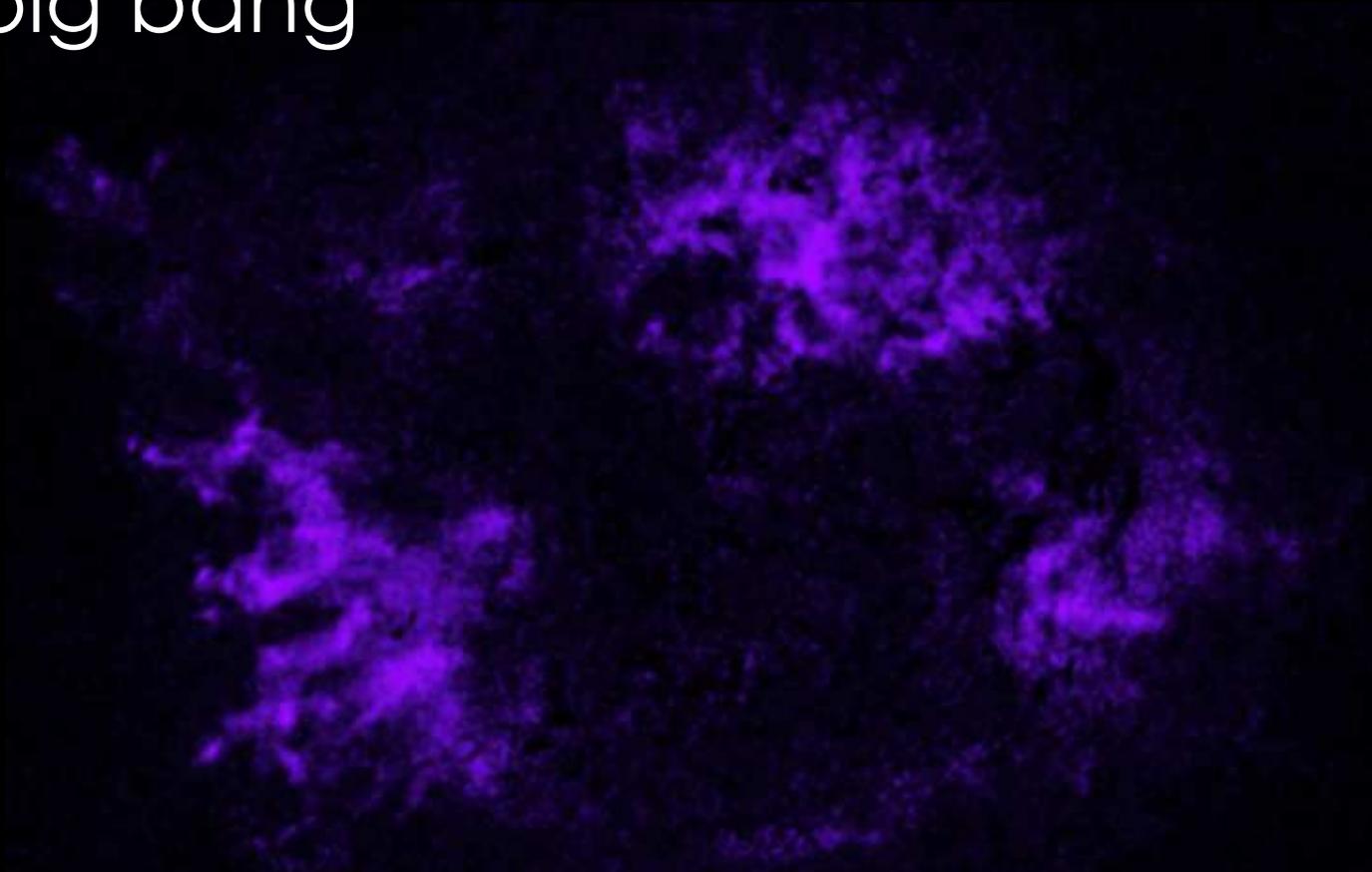
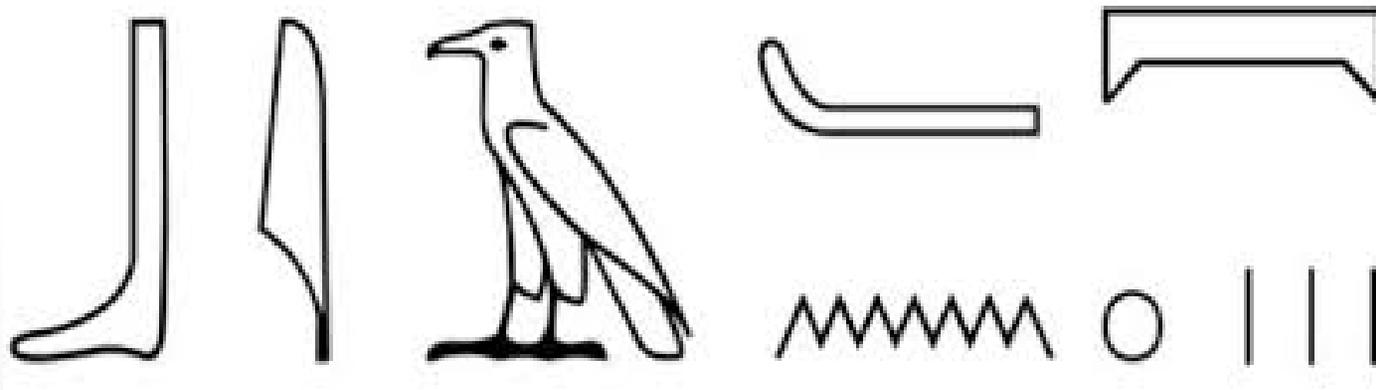


Image du Fer
Diamètre de l'image 10 AL

Fer du Ciel



Fer du Ciel

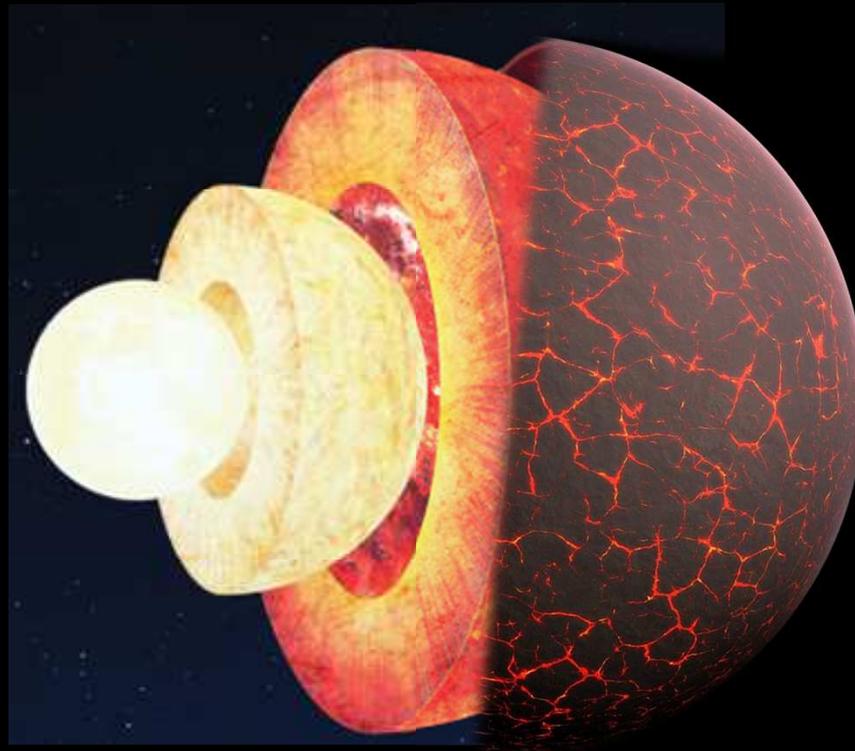
- Un métal plus précieux que l'or!



Dague de Toutânkhamon (1330 BC)

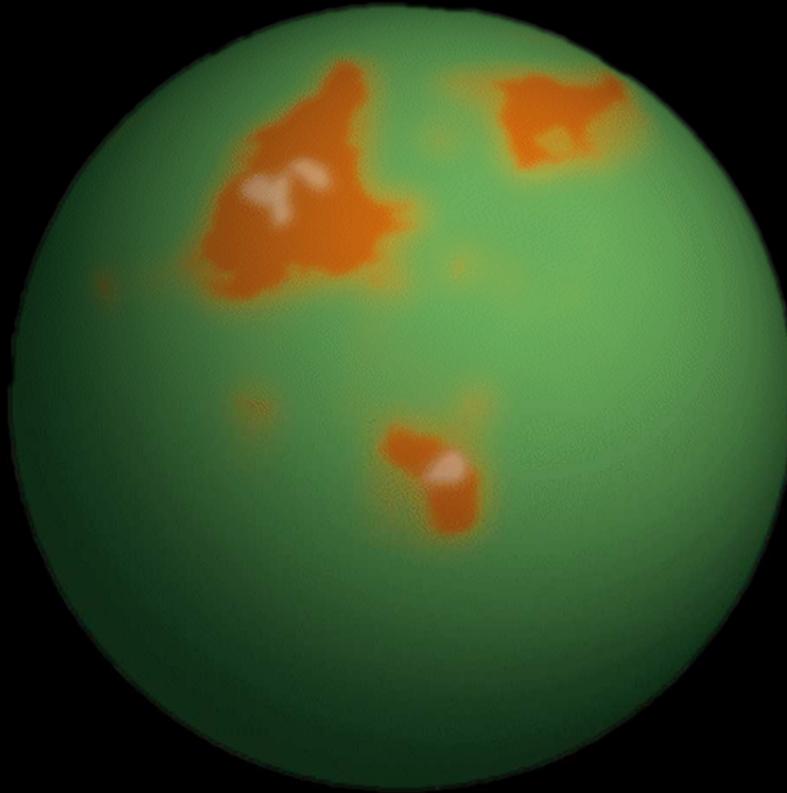
Don't Look Up!

- Il y a 4,5 milliards d'années



Don't Look Up!

- Il y a 3 milliards d'années



Le fer (Fe^{2+}) est dissout dans un océan à 60°C

Don't Look Up!

- Il y a tout juste... 2,5 milliards d'années
 - Great Oxidation Event (GOE) : Apparition d'une atmosphère oxydante
 - Précipitation massive de formations ferrifères rubannées (BIF)



Une histoire sidérurgique

Il faut le fer!

- Réduction et fusion du minerai de fer dans le haut-fourneau
 - > 1450 °C

Charbon de bois



Déforestation Massive

> Production de fer non-soutenable (Buffon, 1783)



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

Il faut encore le fer!

- Sidérurgie moderne
 - John Cockerill (1817)

Cokéfaction du charbon



1,9 tonnes CO₂ par tonne acier
> 5% des émissions mondiales de GES en 2022



Haut-Fourneau HFB d'Ougrée

Il faut toujours le fer!

- Production mondiale de 1,5 Gt d'acier
 - 450 kg acier / pers an (Europe)

Où trouver l'hydrogène?

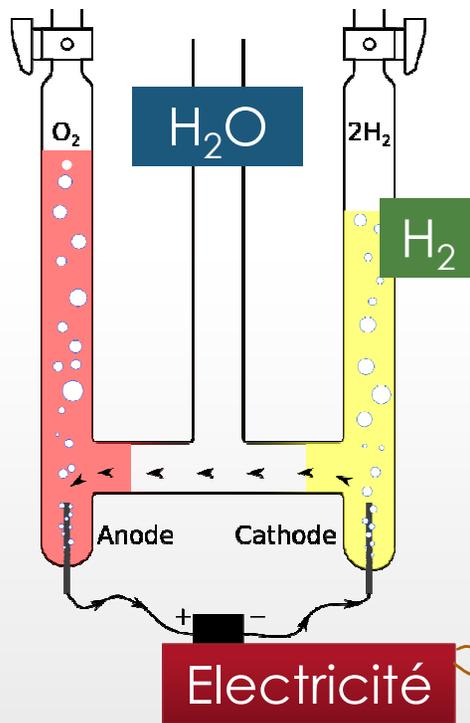


Vapeur d'eau!

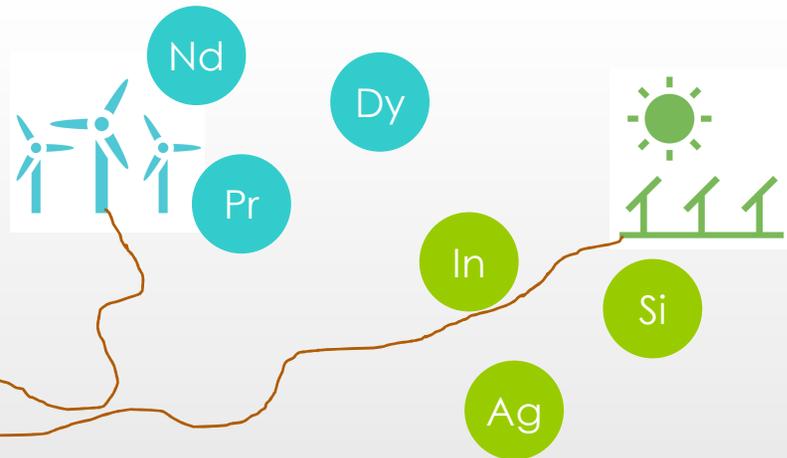


Hydrogène Vert

- Il faut de l'eau et de l'électricité ... « verte »



John Cockerill



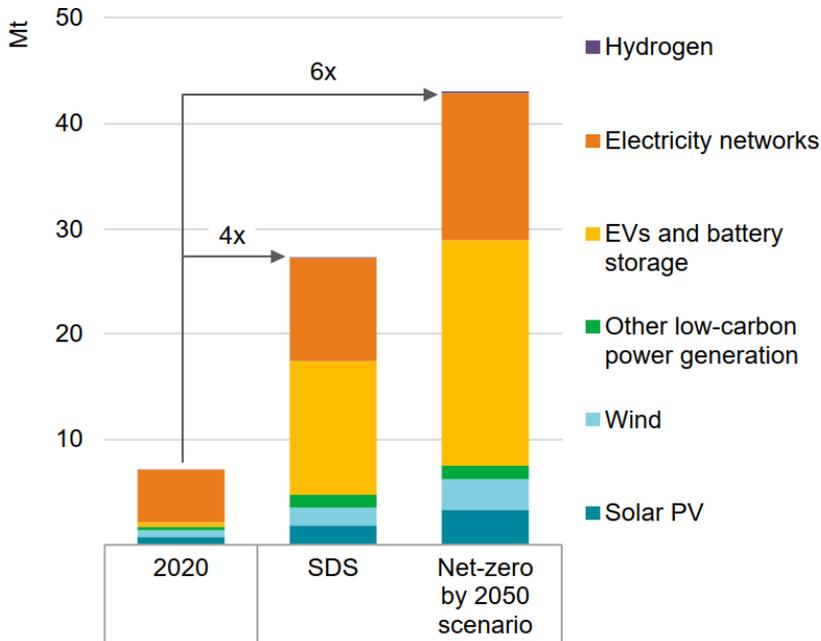
Les métaux du Green Deal

The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions

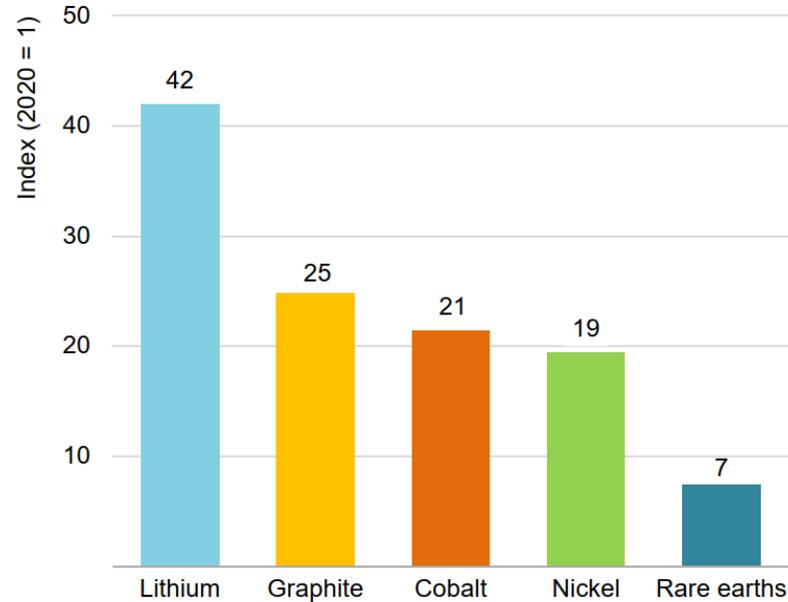


Mineral demand for clean energy technologies by scenario

Growth to 2040 by sector



Growth of selected minerals in the SDS, 2040 relative to 2020

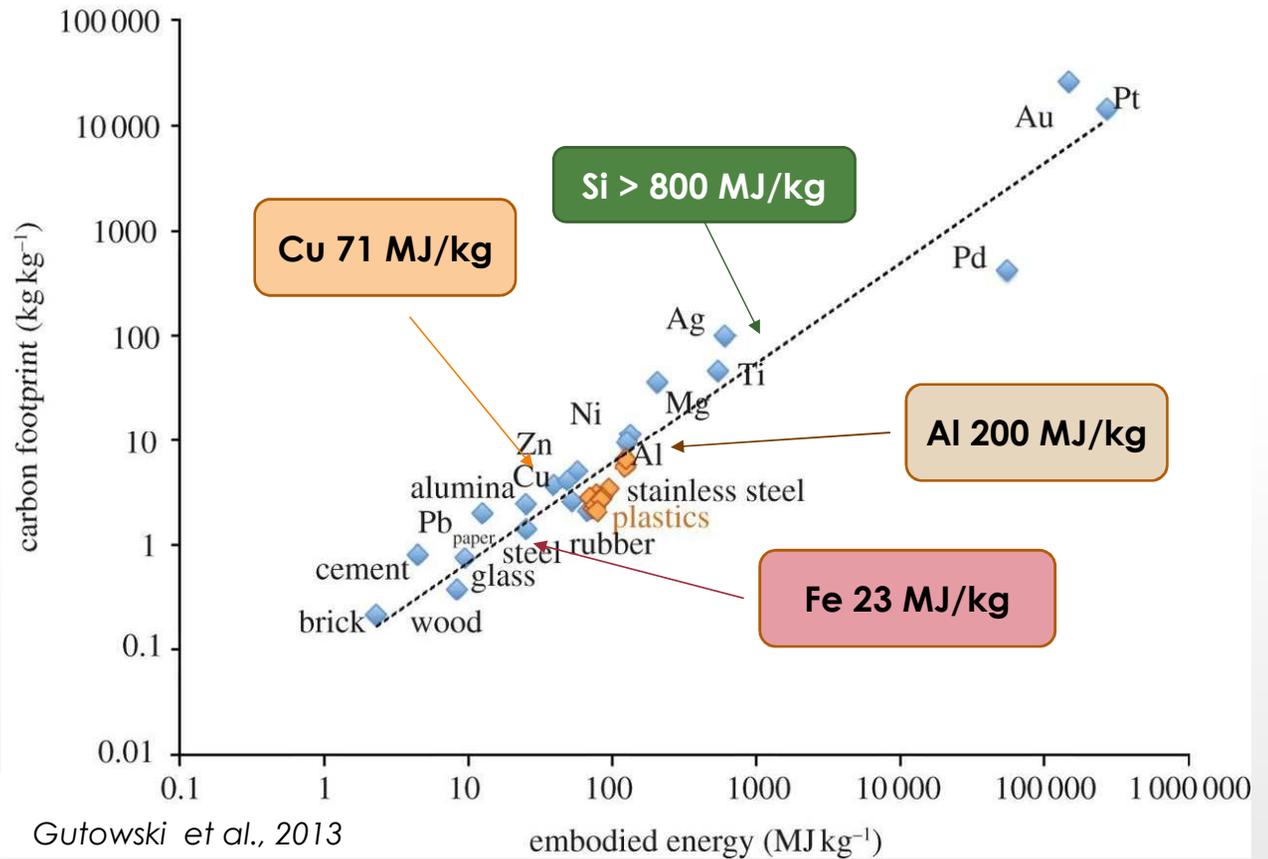


IEA. All rights reserved.

Energie grise des métaux

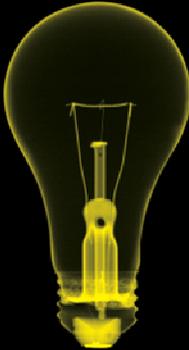


- Echelles logarithmiques!



Un problème éclairant

Ce qui pose problème, ce ne sont pas tant les ressources disponibles que l'usage que l'on en fait

<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, ...

Repenser le cycle des métaux

Prémices d'une économie plus circulaire

Repenser le cycle des métaux

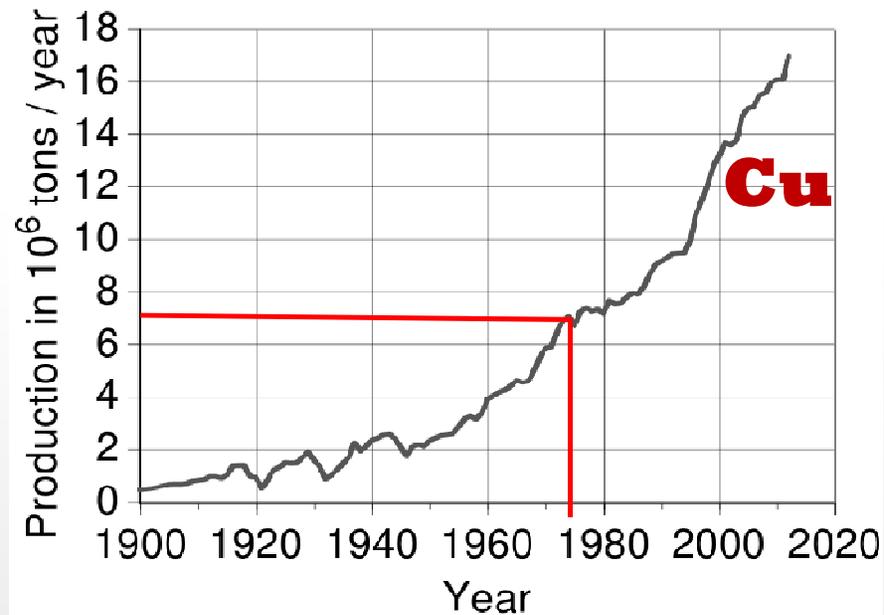
- Les 4 défis de l'économie circulaire



- Chaque opération apporte son lot de déchets
 - $(95\%)^{14} = 50\%$

Repenser le cycle des métaux

- Défi n°1 : Feed the Loop
 - Le recyclage seul ne peut suffire



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

Repenser le cycle des métaux

- Défi n°2 : Design the Loop
 - Anticiper le recyclage
 - Eviter les matériaux composites non indispensables



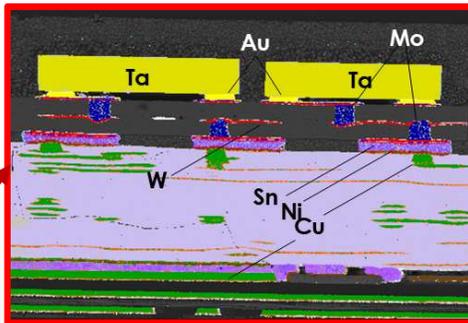
1970



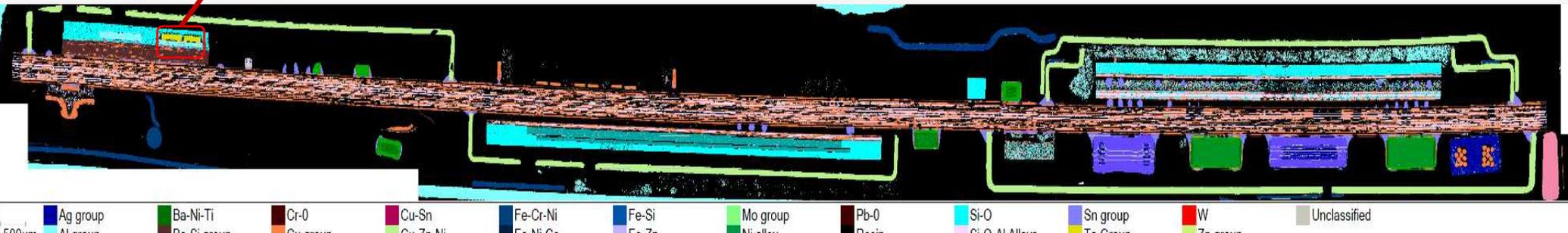
2020

Repenser le cycle des métaux

- Défi n°4 : Close the Loop
 - Récupération des métaux par voie hydrométallurgique
 - Dissolution sélective
 - Basses température
 - Précipitation de nanopoudres, cathodes,...



Hydrometallurgical pilot facilities @ULiege



Ag group	Ba-Ni-Tl	Cr-O	Cu-Sn	Fe-Cr-Ni	Fe-Si	Mo group	Pb-O	Si-O	Sn group	W	Unclassified
----------	----------	------	-------	----------	-------	----------	------	------	----------	---	--------------

The End...

Anthropie ou Entropie?

