

Université de Liège
Faculté des Sciences
Département de Géologie
Laboratoire de Minéralogie



De l'extraction minérale à la fabrication des matériaux, quels impacts ont nos étalages?

Prof. Frédéric Hatert

Gembloux, le 13 décembre 2025

Plan de l'exposé

1. Introduction

2. Métaux de base

3. Nouvelles technologies

4. Problèmes environnementaux

5. Recyclage des métaux rares

Ressources géologiques



Eau

Matériaux de construction

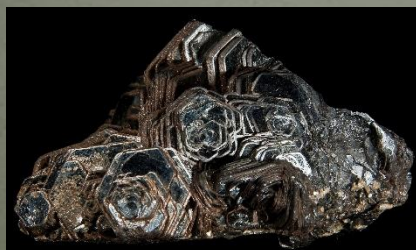
Pétrole, gaz, charbon

Ressources géologiques

Minerais

Gemmes
Métaux précieux

Minéraux industriels



Combustibles fossiles



Tourbe

Charbon



Lignite

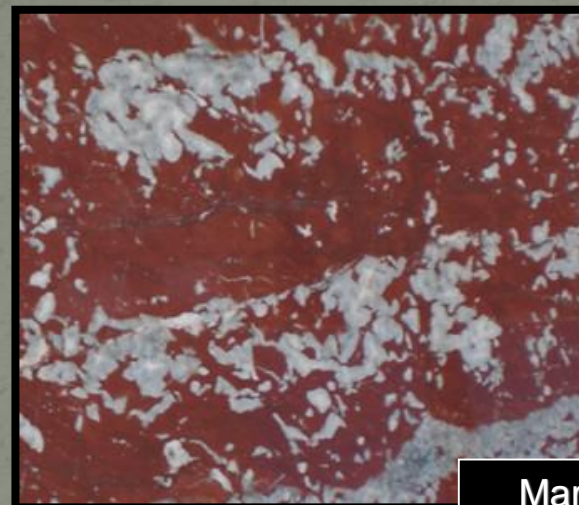


Pétrole, gaz

Matériaux de construction



Moellons



Marbres



Granulats

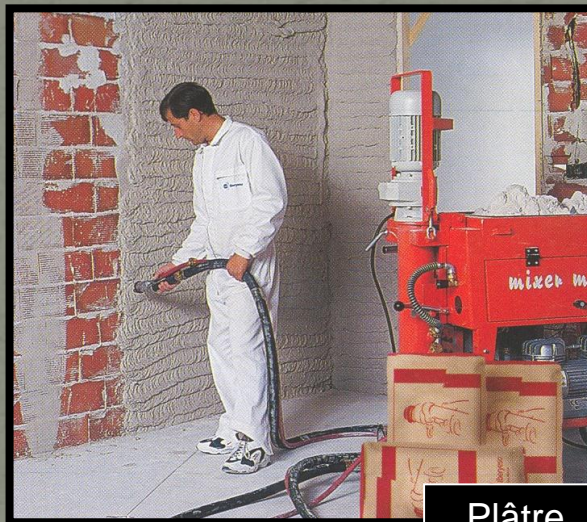


Ardoises

Matériaux de construction



Gypse, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$



Plâtre



Ciment, béton



Briques



Minéraux industriels

Sable



Verre



Feldspaths,
(K,Na,Ca)Al₁₋₂Si₂₋₃O₈



Céramique

Minéraux industriels



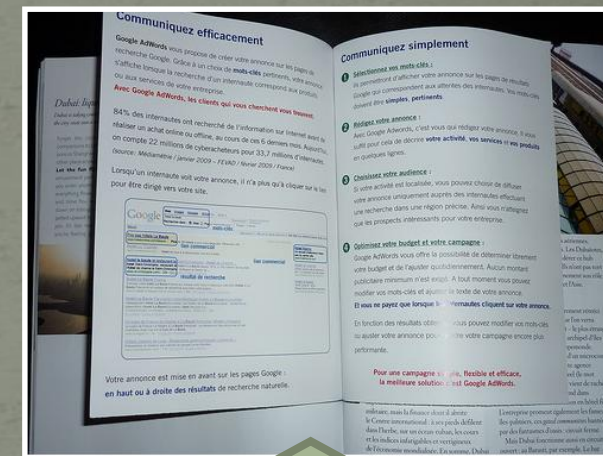
Calcite, CaCO_3



Papier



Rutile, TiO_2



Médicaments



Kaolinite,
 $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{12}](\text{OH})_8$



Gemmes (pierres précieuses)



Diamant, C

Corindon,
 Al_2O_3

Saphir



Béryll,
 $Be_3Al_2Si_6O_{18}$



Rubis

Emeraude



Métaux nobles



Or, Au

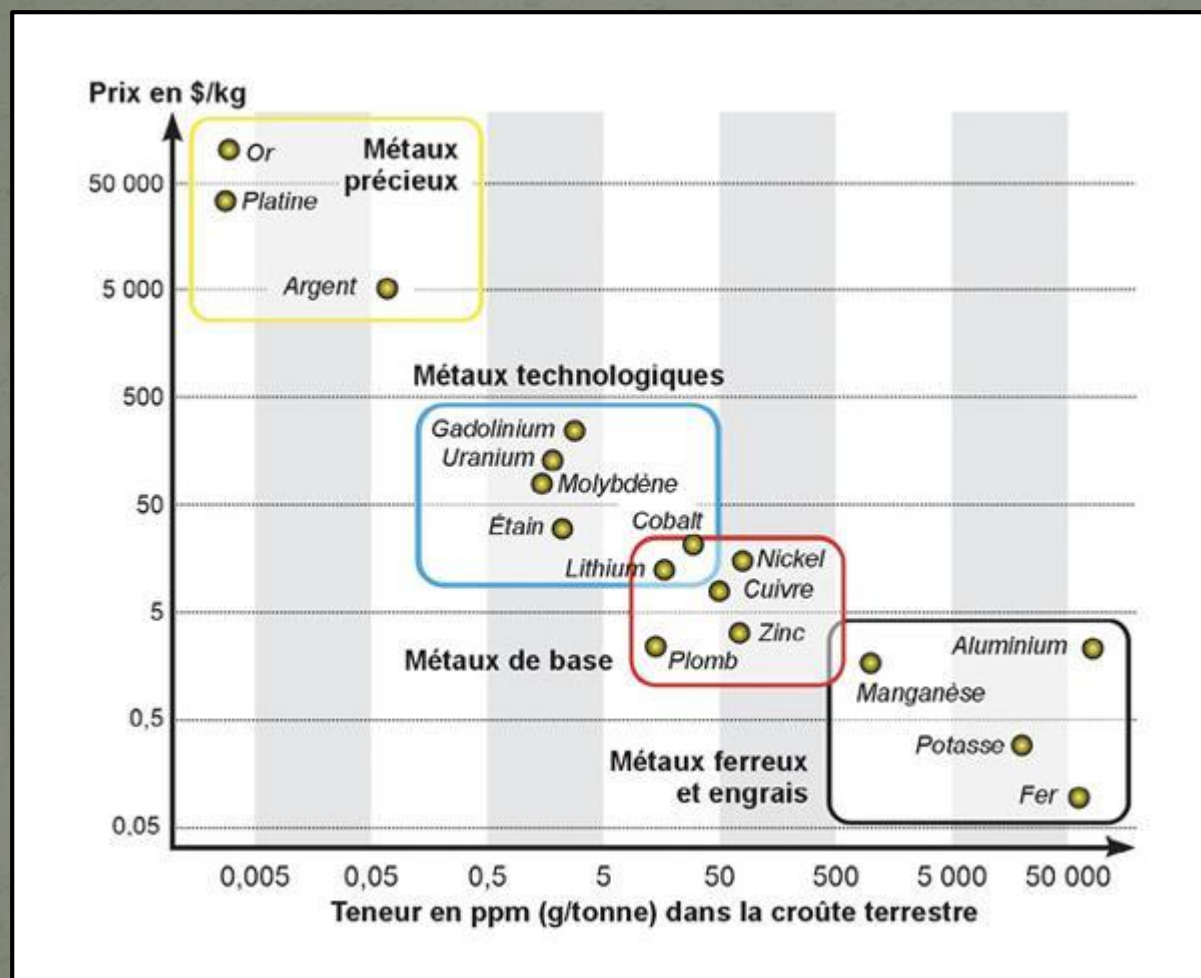


Argent, Ag



Platine, Pt

Abondance des métaux



- Fer : 50 kg/tonne
- Métaux de base : ~ 50 g/tonne
- Métaux technologiques : 1-4 g/tonne
- Métaux précieux : 5 mg/tonne

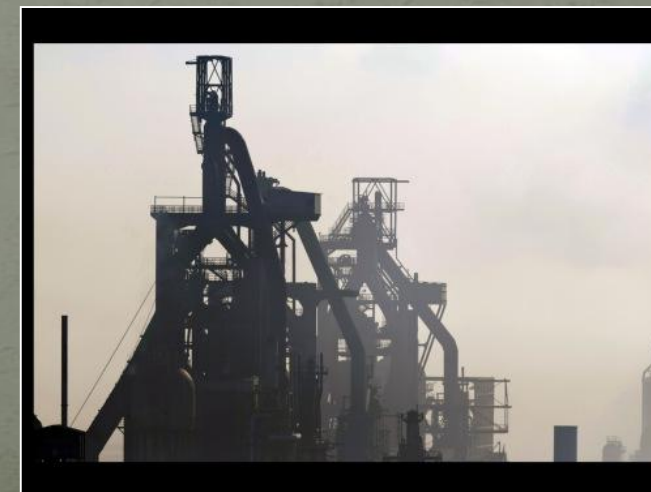
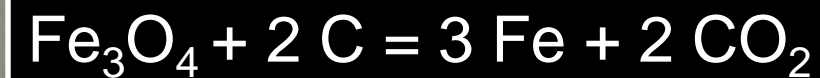
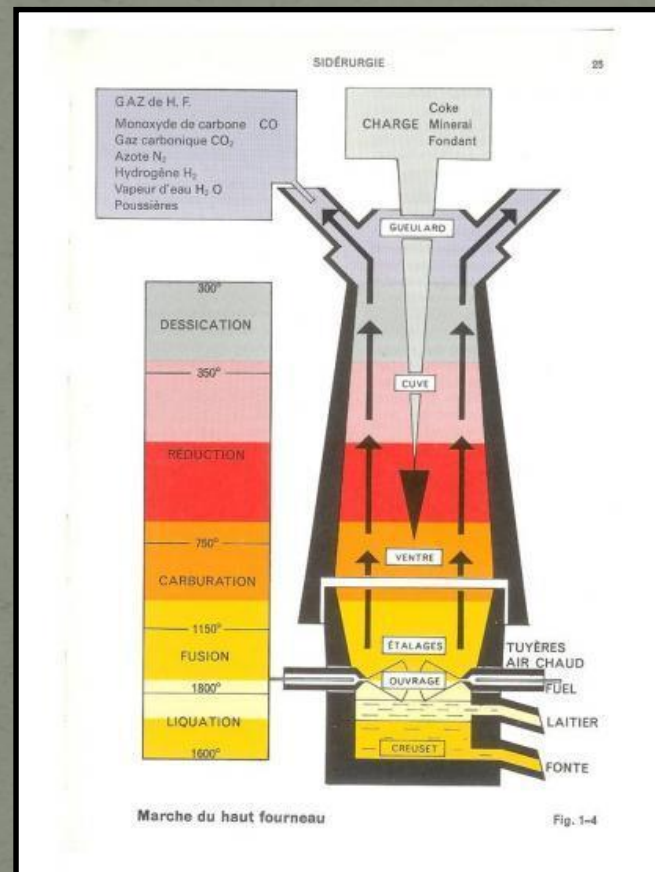
Les métaux de base : le fer



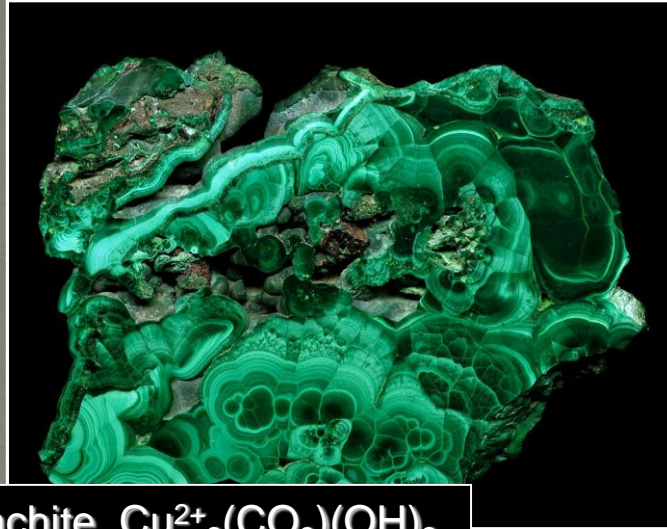
Hématite, Fe_2O_3



Magnétite, Fe_3O_4



Le cuivre



Malachite, $\text{Cu}_2^+(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$



UMHK, Lubumbashi, 1917.

- Chili
- 1/3 de la production mondiale
- Chuquicamata
- « Porphyry copper »
- < 2,5 % de cuivre



Chalcopyrite, CuFeS_2

- Katanga (Congo)
- Teneurs > 5 % Cu



Chuquicamata, Chili

Métallurgie du cuivre

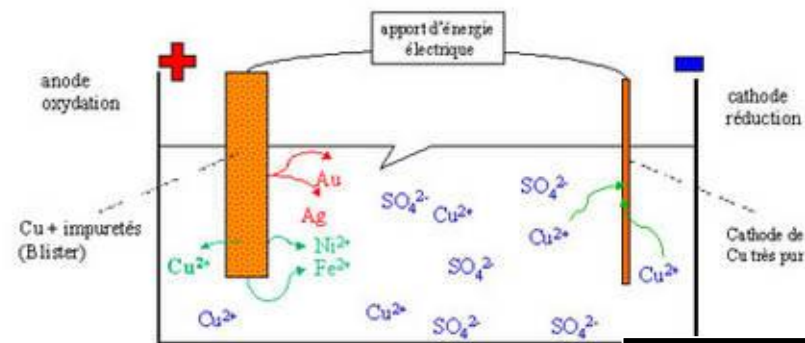


Traitement haute température (1300°C)



Affinage par électrolyse

Affinage électrolytique du cuivre, principe



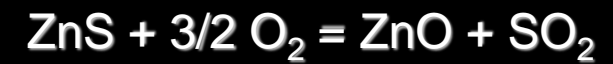
Le zinc



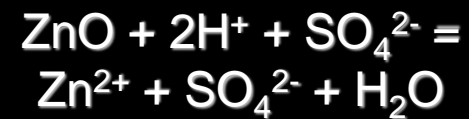
Sphalérite, (Zn,Fe)S



Grillage à 900-1100 °C

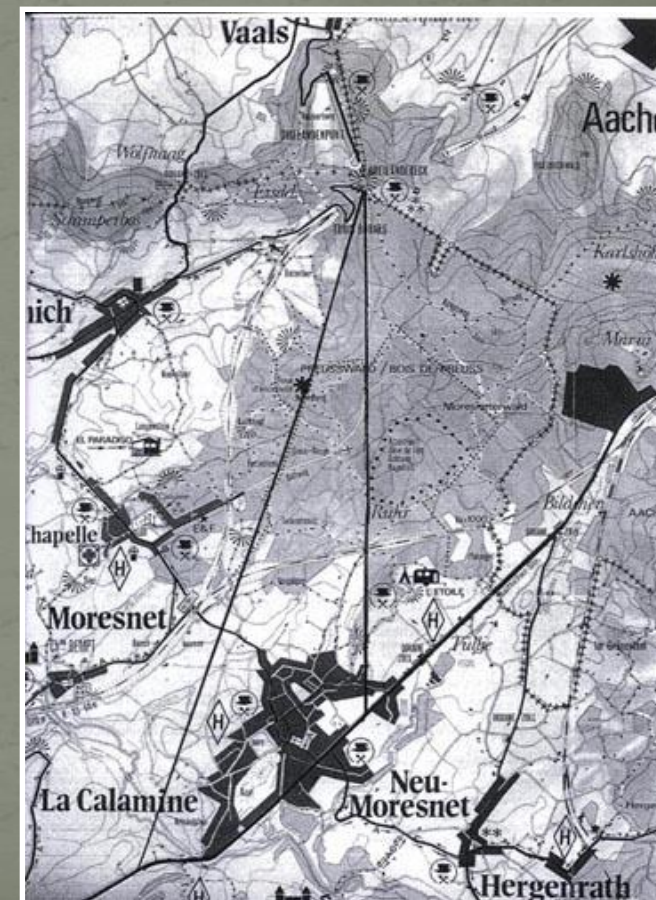
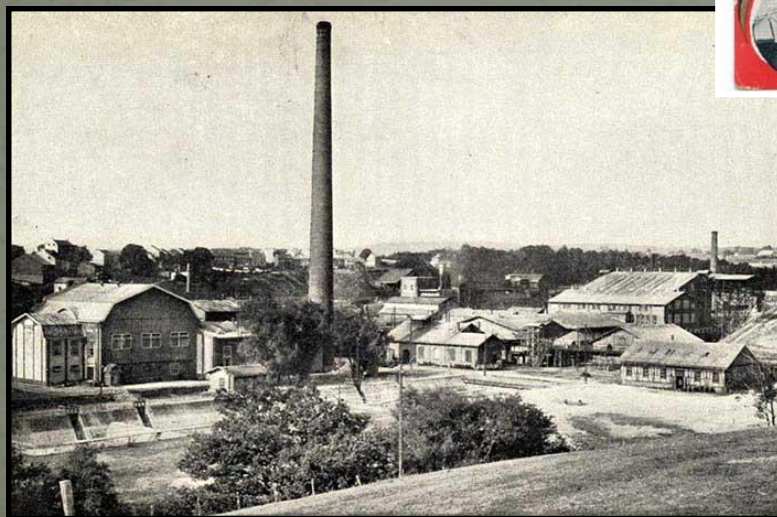
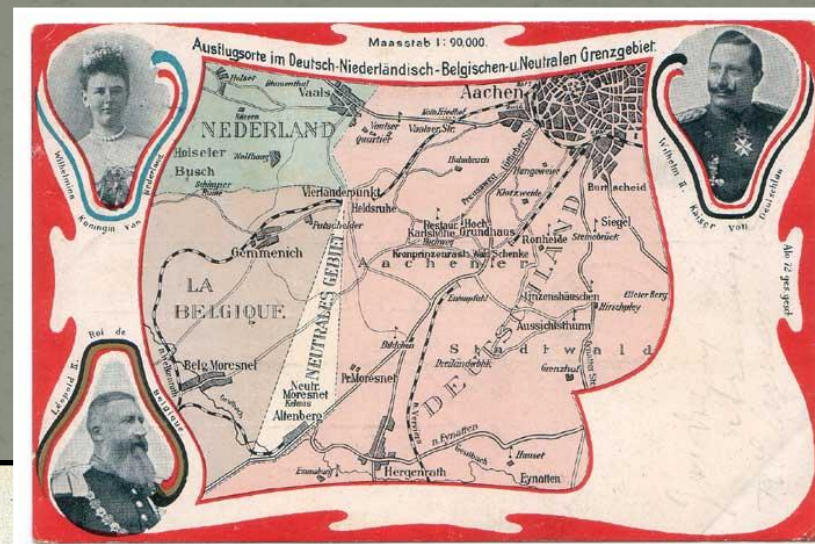


Lixiviation par H_2SO_4



Le zinc de La Calamine

- Région de La Calamine
- Micro-état de 1816 à 1919



Le plomb



Galène, PbS



LA MINE DE PLOMB
DE LONGVILLY

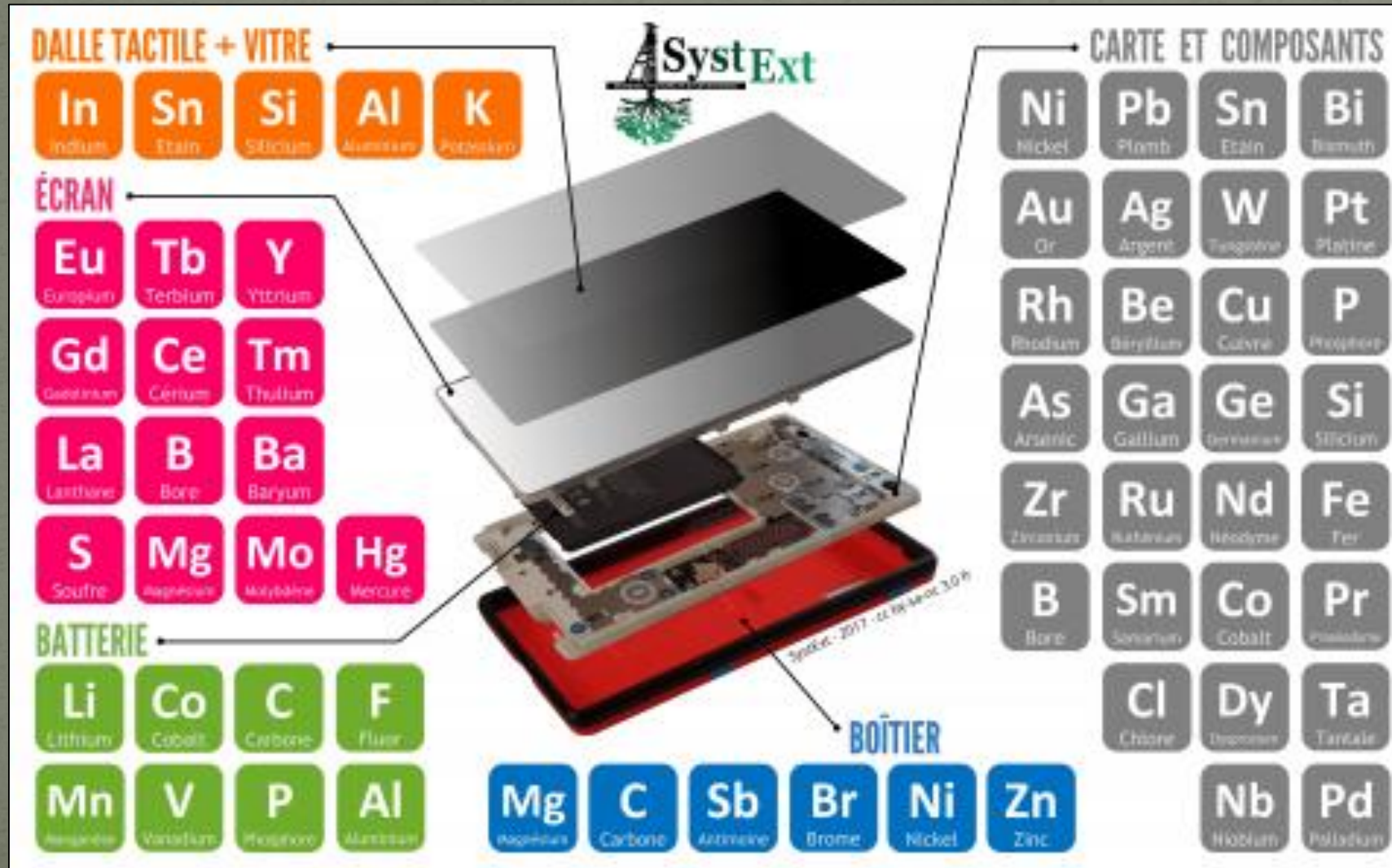


Photo: Harjo Neutkens



Longvilly. — La Mine,

Métaux dans les smartphones



Batterie

Li, Co, Ni, Mn

Composants

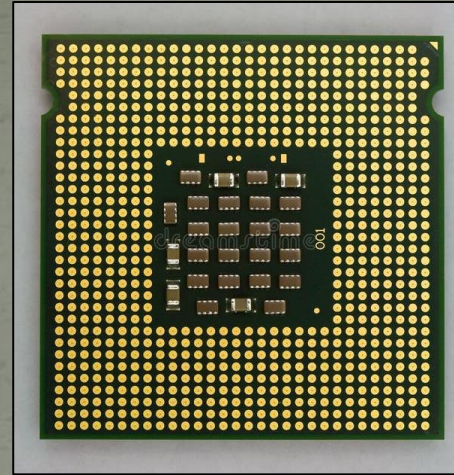
Circuits

Cu, Ta, Sn, Au

Aimants

Terres rares

L'or



Croûte terrestre: $< 5 \text{ mg/T}$

Ordinateur



0,5 g d'or



~ 500 kg de roche



Le tantale

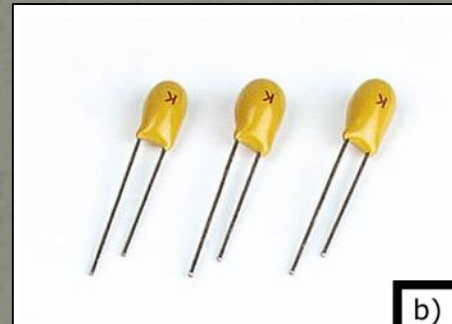


Columbo-tantalite
 $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$

Ordinateur



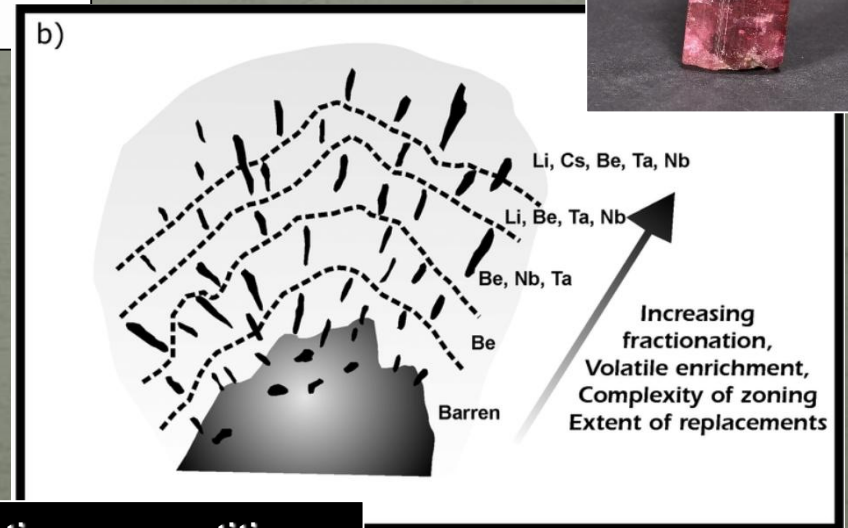
1,7 g de tantale



Elbaïte

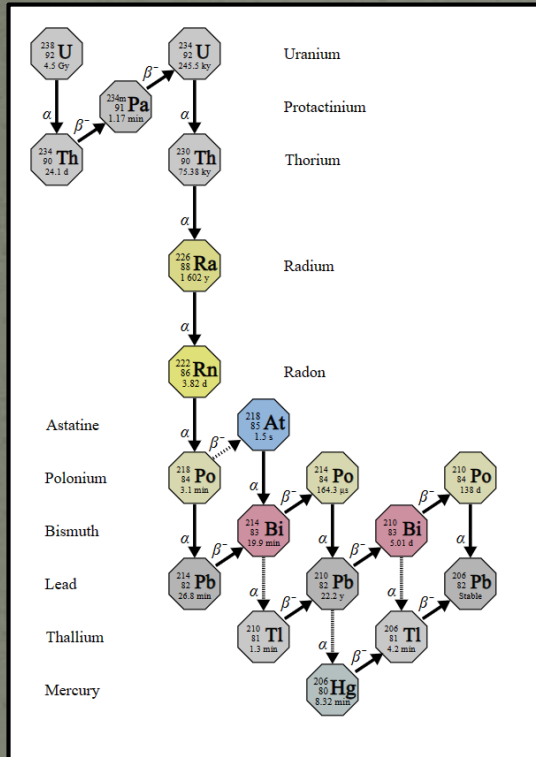


- Australie, Chine, Brésil, RDC (Kivu)
- Croûte terrestre: 1,8 g/T
- Minerais exploitables: 0,05 % Ta
- Gisements : pegmatites granitiques

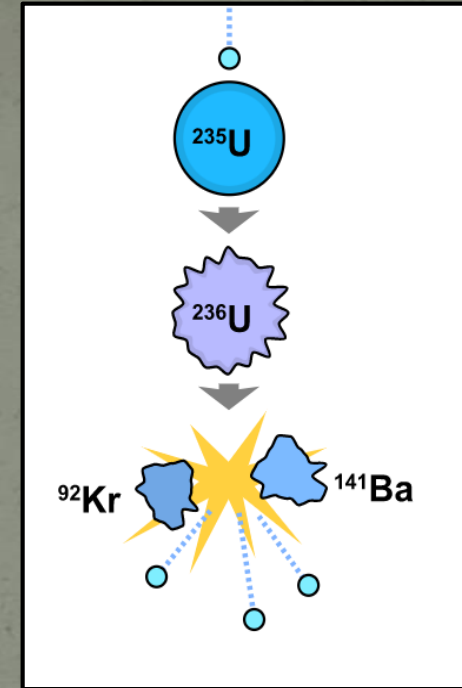
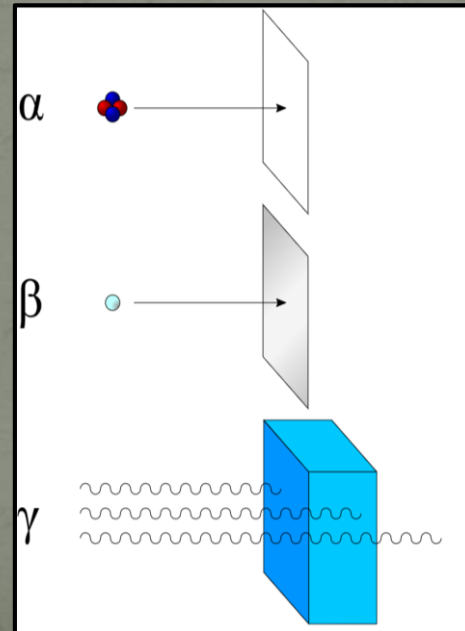


Zonation pegmatitique

L'uranium



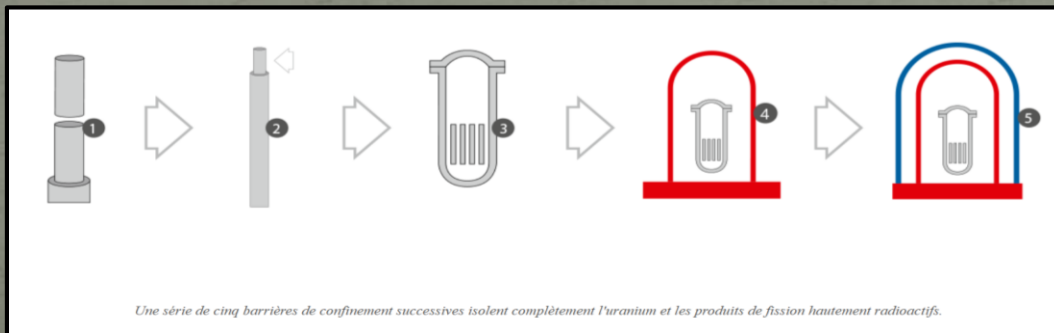
Alpha: 2 protons, 2 neutrons
Béta: Electrons ou positrons



^{238}U : 99,3 %
 ^{235}U : 0,7 %



L'énergie nucléaire

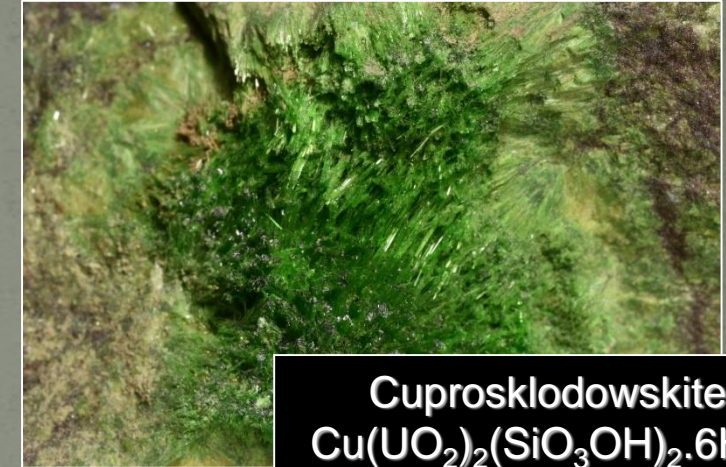


Les minéraux d'uranium

Shinkolobwe, Katanga



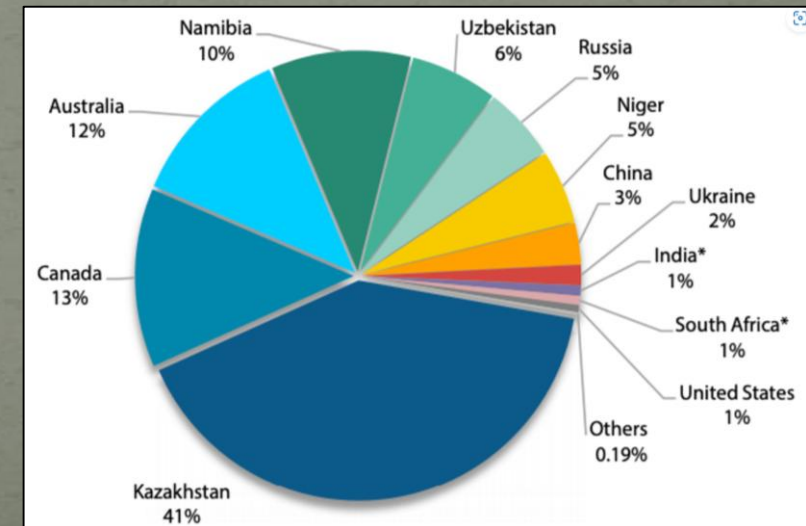
Uraninite, UO_2



Cuprosklodowskite,
 $Cu(UO_2)_2(SiO_3OH)_2 \cdot 6H_2O$

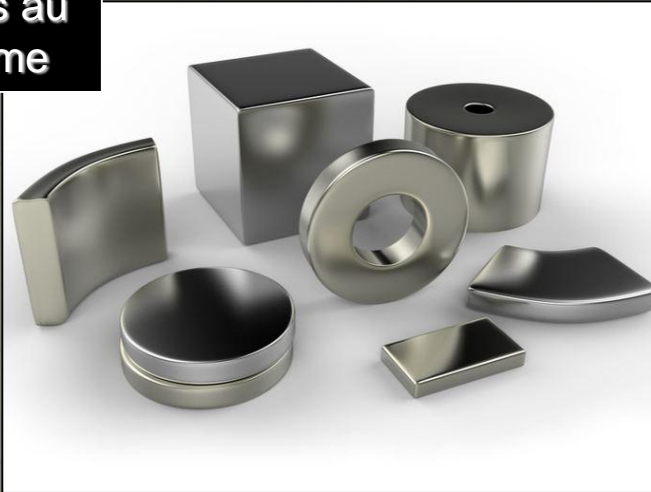


Torbernite,
 $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 12H_2O$



Energie éolienne

Aimants au
néodyme



Eolienne moyenne



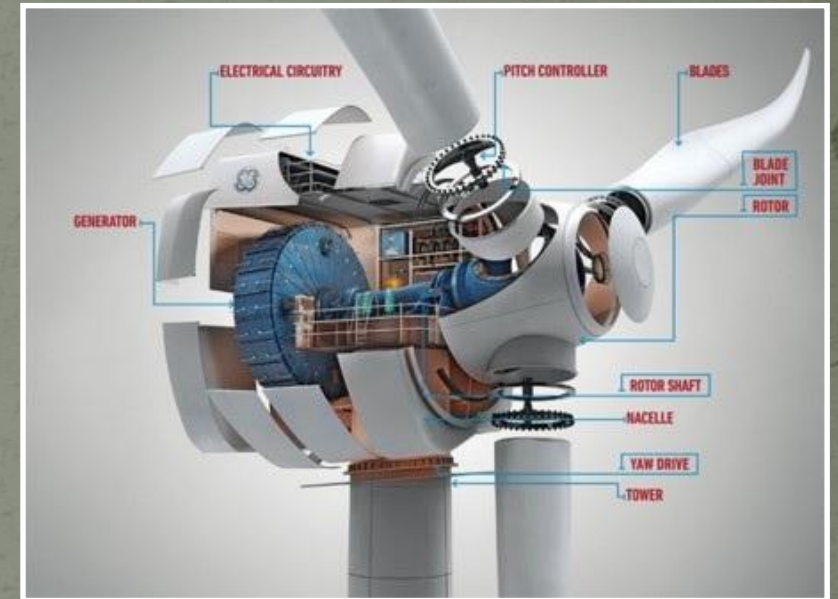
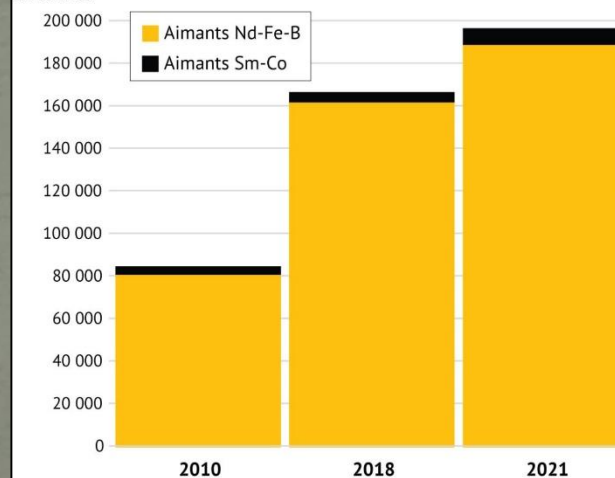
200 à 300 kg Nd

Augmentation des capacités chinoises de production d'aimants permanents



En tonnes

Source : SMM, Adamas Intelligence



Les terres rares



Bastnäsite-(Ce),
 $Ce(CO_3)F$

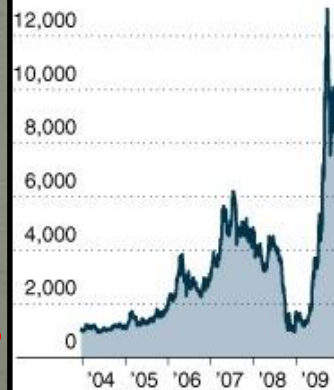


Betting on Rare Earths

An index of companies, primarily Australian and Canadian, that mine or hold a class of minerals known as rare earths has surged in the last 16 months.

KBFO RARE-EARTH INDEX

Jan. 2, 2004 = 1000



Source: Kaiser Bottom-Fish Online

Tableau périodique des éléments chimiques

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18															
1 H																	2 He															
2 Li	3 Be											10 Ne																				
3 Na	4 Mg	5 Al	6 Si	7 P	8 S	9 Cl	10 Ar																									
4 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															
5 Rb	37 Sr	38 Y	39 Zr	40 Nb	41 Mo	42 Tc	43 Ru	44 Rh	45 Pd	46 Ag	47 Cd	48 In	49 Sn	50 Sb	51 Te	52 I	53 Xe															
6 Cs	54 Ba	55-71 Lanthanides	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															
7 Fr	87 Ra	88-103 Actinides	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															
<table border="1"> <tr> <td>72 La</td> <td>73 Ce</td> <td>74 Pr</td> <td>75 Nd</td> <td>76 Pm</td> <td>77 Sm</td> <td>78 Eu</td> <td>79 Gd</td> <td>80 Tb</td> <td>81 Dy</td> <td>82 Ho</td> <td>83 Er</td> <td>84 Tm</td> <td>85 Yb</td> <td>86 Lu</td> </tr> </table>																		72 La	73 Ce	74 Pr	75 Nd	76 Pm	77 Sm	78 Eu	79 Gd	80 Tb	81 Dy	82 Ho	83 Er	84 Tm	85 Yb	86 Lu
72 La	73 Ce	74 Pr	75 Nd	76 Pm	77 Sm	78 Eu	79 Gd	80 Tb	81 Dy	82 Ho	83 Er	84 Tm	85 Yb	86 Lu																		

-- nom du élément, type, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa
 -- numéro atomique
 -- symbole chimique
 -- masse atomique relative (ou celle de l'isotope le plus stable)
 * [CIAAW "Atomic Weights 2013" - rev. 2015]

Métaux: Alcalins, Alcalino-terreux, Lanthanides, Actinides, Métaux de transition, Métaux pauvres, Métalloïdes, Autres métaux, Halogènes, Gaz nobles, Non classés.
 État naturel: primordial, d'autres éléments, synthétique.

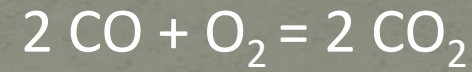
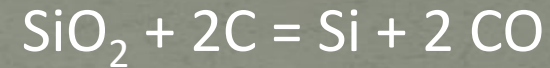


Monazite-(Ce),
 $CePO_4$

Energie photovoltaïque



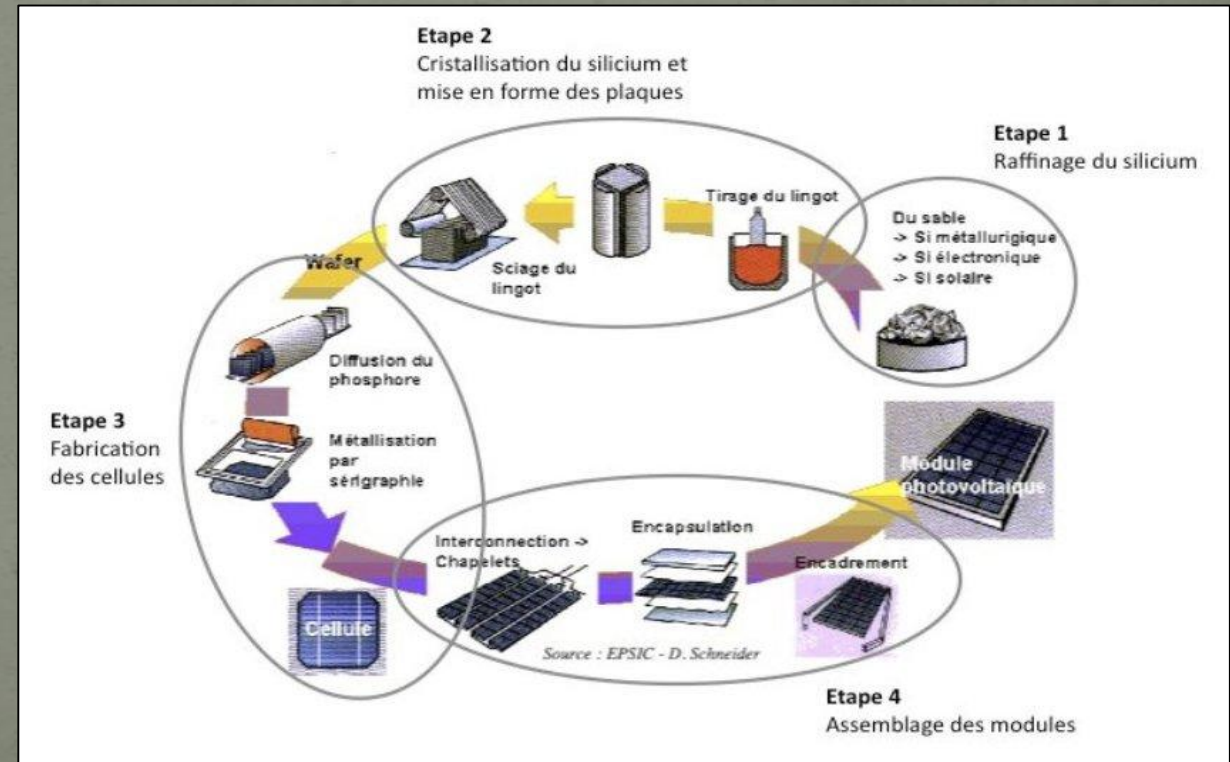
Réduction de la silice par le carbone à 1700°C :



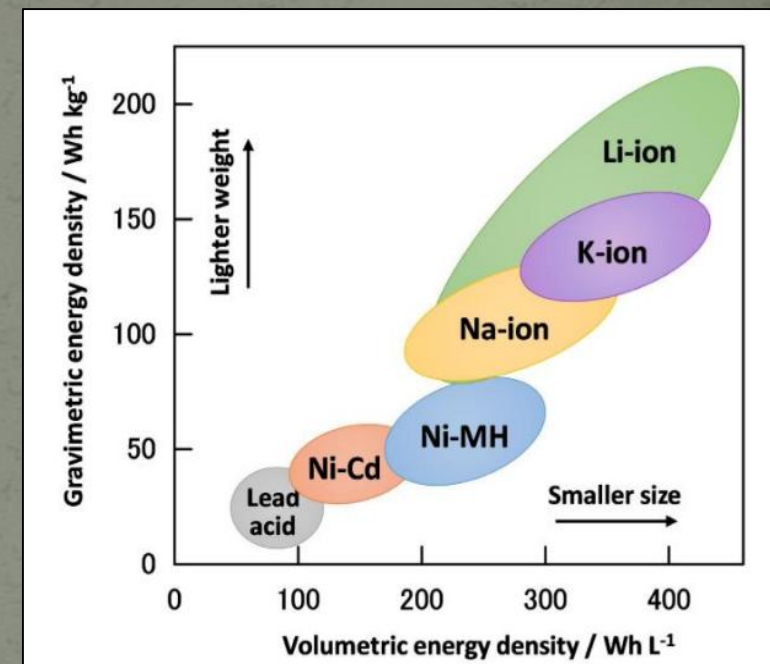
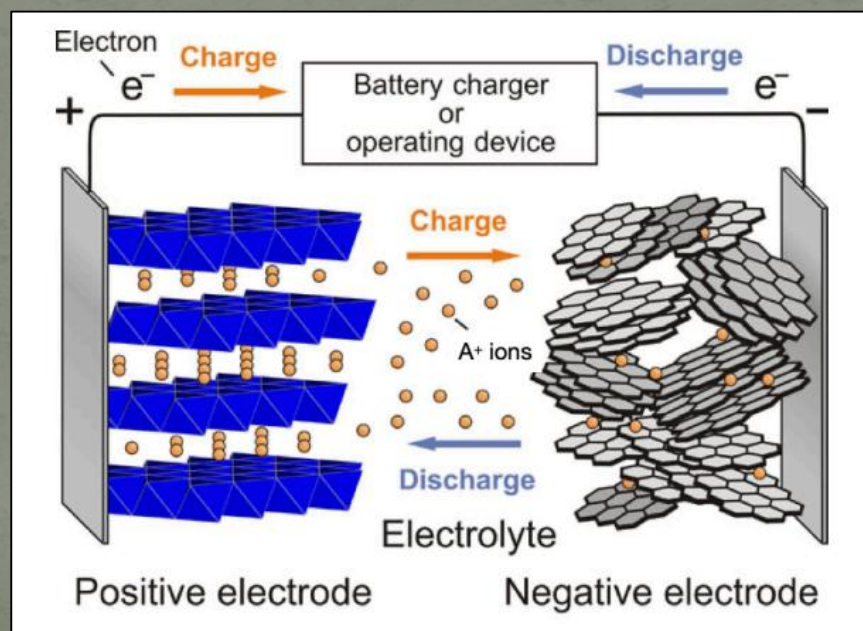
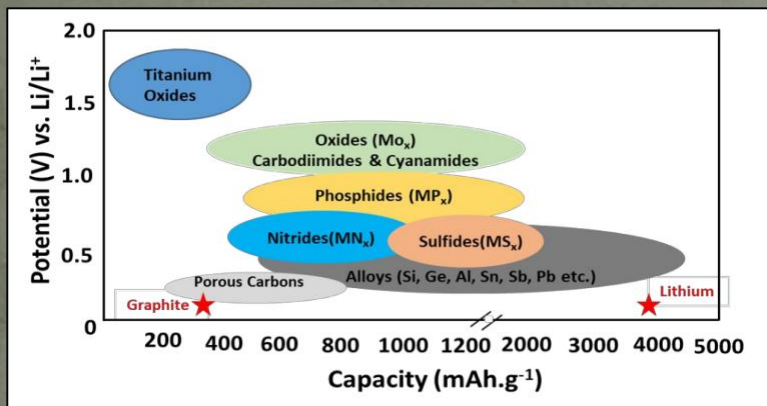
- Transformation directe d'énergie solaire en énergie électrique
- Silicium dopé « P » ou « N »



Lingots de silicium

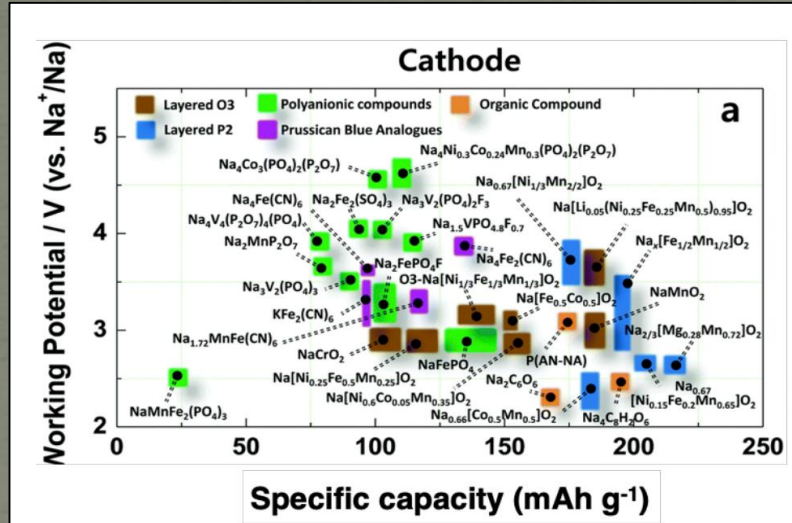


Batteries Li-ion: principe



- Anode : graphite
- Cathode: LiCoO_2 ou $\text{LiFe(PO}_4)$

Batteries Na-ion



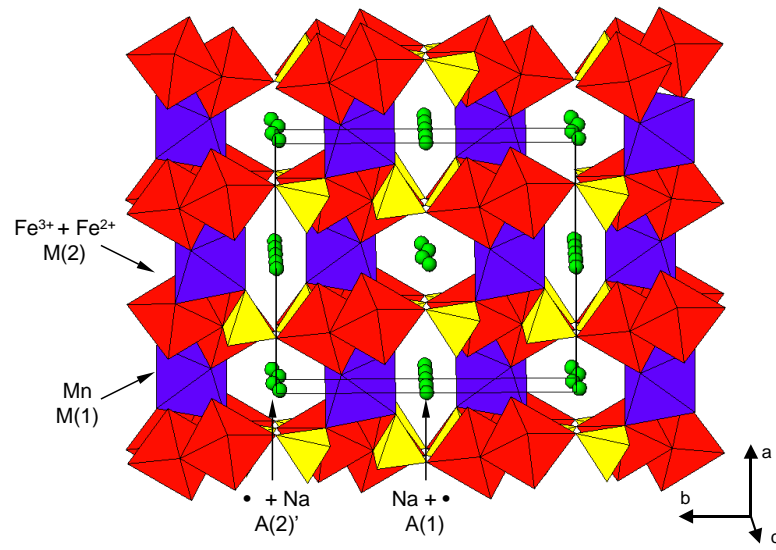
- Na beaucoup plus abondant que Li
- Batteries Na-ion se rechargent plus vite
- Meilleure longévité



R160080

Alluaudite, Buranga,
Rwanda

Structure
alluaudite



Sodium-based batteries could solve the lithium crunch

These batteries could become a viable, cheaper alternative—but it may take several years.



Francis Scialabba

Gisements de lithium : pegmatites



Spodumène (Kunzite)



Pétalite



- Australie (22 %) : pegmatites



Gisements de lithium : évaporites



Salar du Chili



- Chili (33 %) : évaporites (LiCl)

Le cobalt



Skutterudite,
(Co,Ni)As₃



Erythrite,
 $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$



Bou Azzer, Maroc

Kolwezi, Katanga



- Gisements rares
- Toxique pour l'environnement

Consommation énergétique

- Secteur minier très énergivore
- 3,5 % de la consommation énergétique mondiale
- Extraction, broyage, transport



Pollution des eaux

Bento Rodrigues,
Brésil, 2015



- Rupture des digues de bassins de décantation
- Catastrophes écologiques

Baia Mare,
Roumanie,
2000



Brumadinho,
Brésil, 2019

Impacts sur la santé humaine



- Travaux dans des conditions difficiles
- Pollution de l'eau, du sol, de l'air
- Manque d'eau potable
- Conflits armés (Kivu)



Radiofrance website navigation: Radios, Podcasts, Catégories, Musique, Enfants, radiofrance, Mon petit France II

france nter | Grille des programmes | Podcasts | Info | Culture | Humour | Musique | Vi

« La mine de Bou-Azzer, créée en 1934 pendant la colonisation française, n'a cessé de s'agrandir et produit aujourd'hui plus de **2 400 tonnes** de cobalt, métal essentiellement destiné aux **batteries des véhicules**, et près de 7 700 tonnes d'arsenic, une substance hautement toxique utilisée dans certains pesticides et la production d'électronique. Bien que la Managem ne publie pas ses prélèvements en eau, on peut estimer que les usines de traitement du minéral de Bou-Azzer nécessitent environ 1 million de m³ d'eau par an dans cette région désertique, soit l'équivalent de la consommation locale de 50 000 personnes. »

Solutions: exploitations « vertes »?



Lloyds' Surjagarh,
mine « verte », Inde

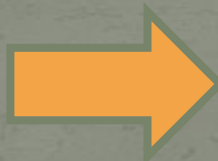
- Quelques efforts pour passer à des énergies renouvelables
- Impossible à implémenter à grande échelle
- “Green washing”



‘Greenwashing’ of the mining industry

La règle des 4 « R »

Recycler



Réduire sa production de déchets

Réparer

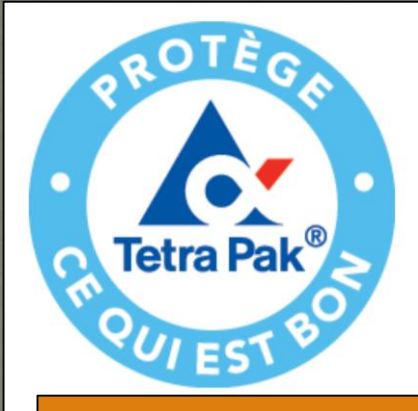


Réutiliser

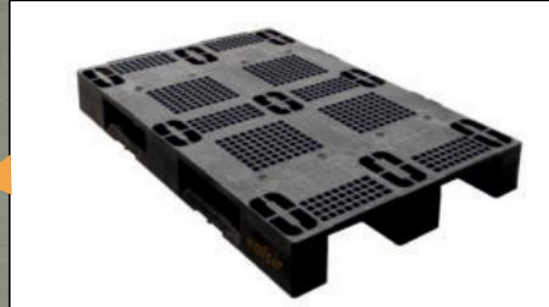


Valorisation

Recyclage et valorisation



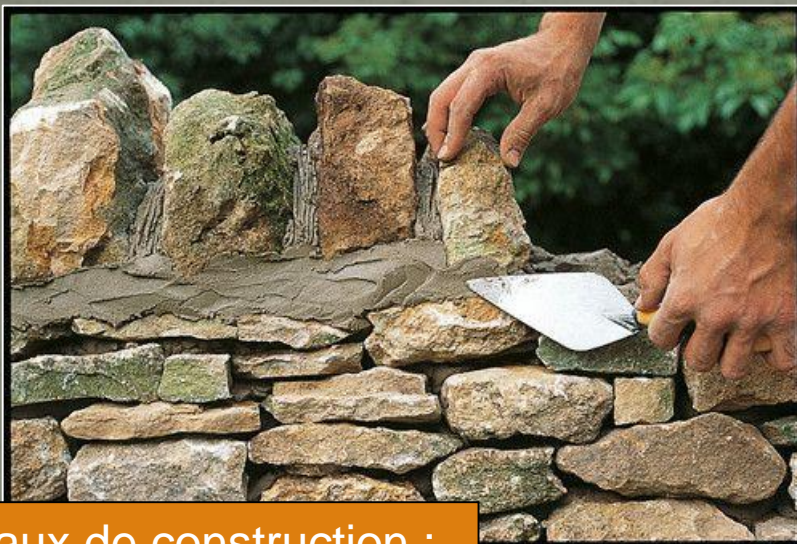
Tétra Pak : Valorisable



Papier : Recyclable

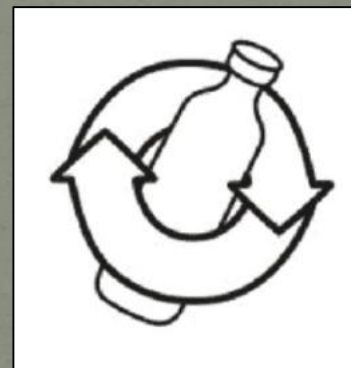


Recyclage des ressources géologiques



Matériaux de construction :
Valorisable (réutilisable)

Minéraux industriels :
Verre, recyclable

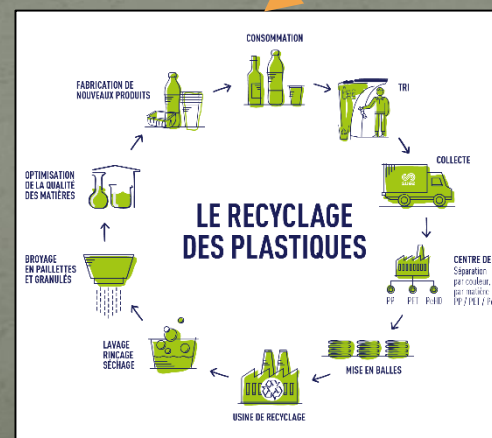
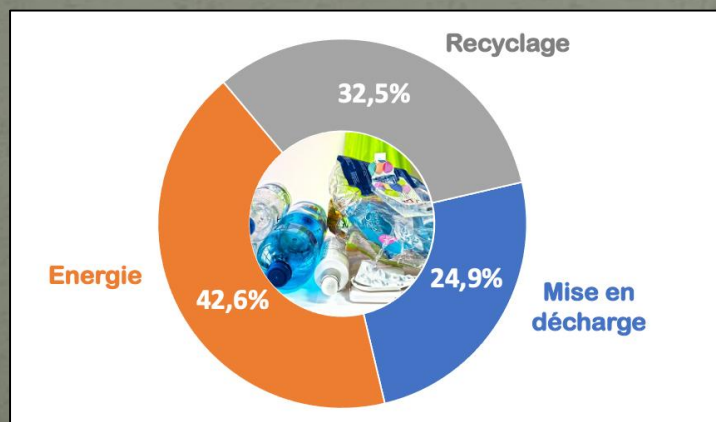
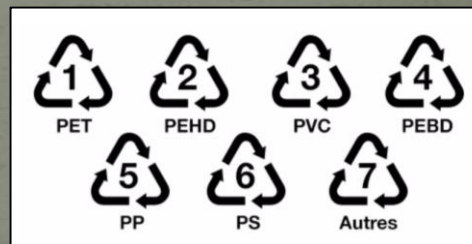


Gemmes :
Réutilisation

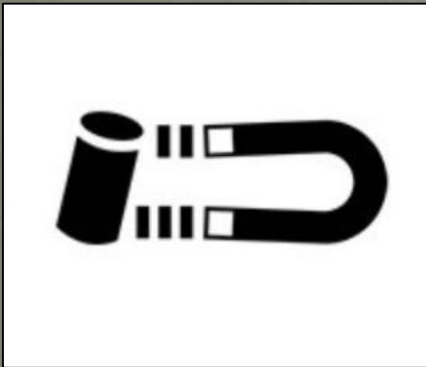
Valorisation des plastiques



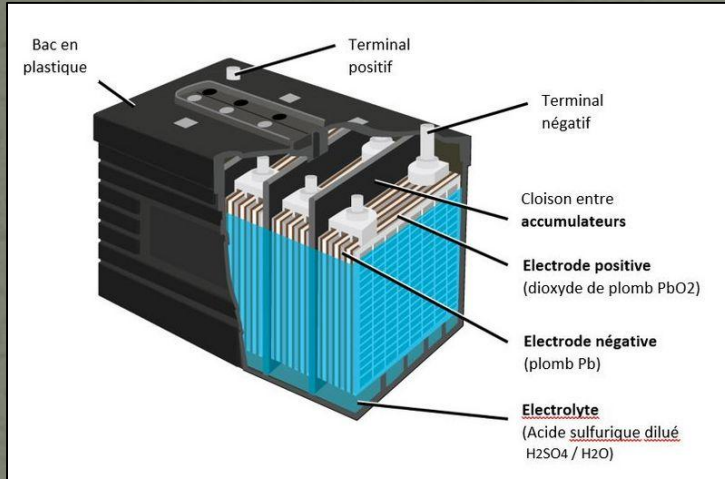
Pétrole : Plastiques, valorisable



Recyclage du fer



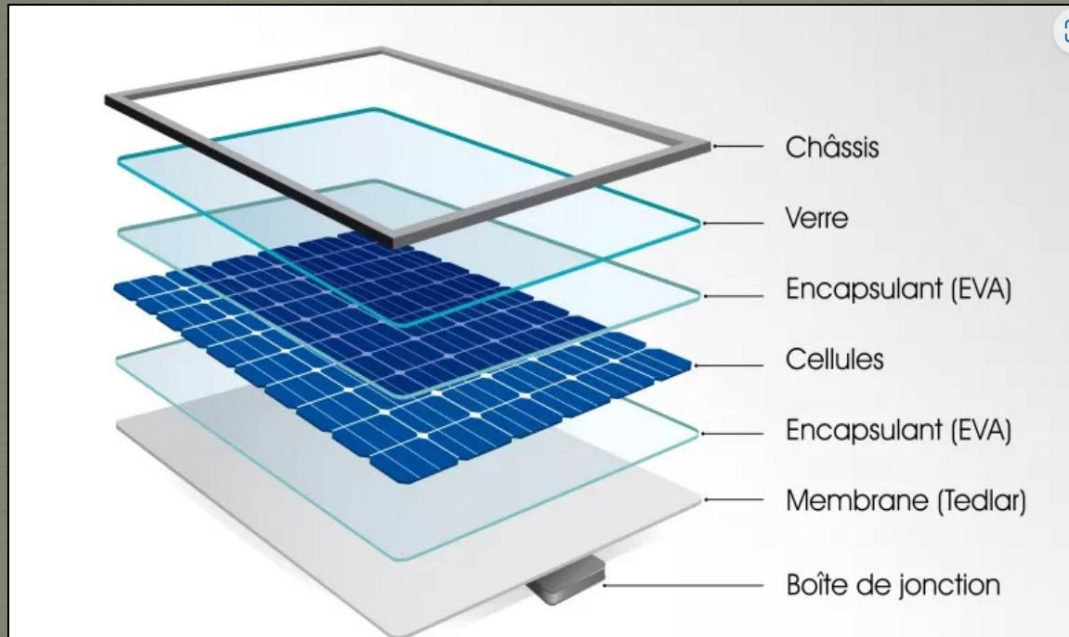
Recyclage des métaux de base



Zn



Solution : le recyclage?



93 % recyclable 😊

- Cadre en aluminium
- Verre (75 % de la masse du panneau)
- Conducteurs en cuivre et argent
- Plastiques (fondus, granulés)

7 % non-recyclable 😞

- Cellules en silicium
- Semi-conducteurs contenant Se, Ga, In...



Valorisation du silicium
pour la fabrication
d'électrodes pour
batteries Li-ion

Recyclage des éoliennes ?



- Béton : 1500 t
- Acier : 587 t
- Fibres de verre : 32 t
- Polymères : 15 t
- Aluminium et cuivre : 10 t
- Terres rares : 1 t
- Divers : 5 t



Enfouissement
(USA)



Broyage (Matériaux,
remblais)



Incinération
(Cimenterie)

Recyclage des composants électroniques

Afrique (Ghana, Nigéria):

- Déchets électroniques incinérés
- Récupération or, cuivre, aluminium
- Désastre écologique



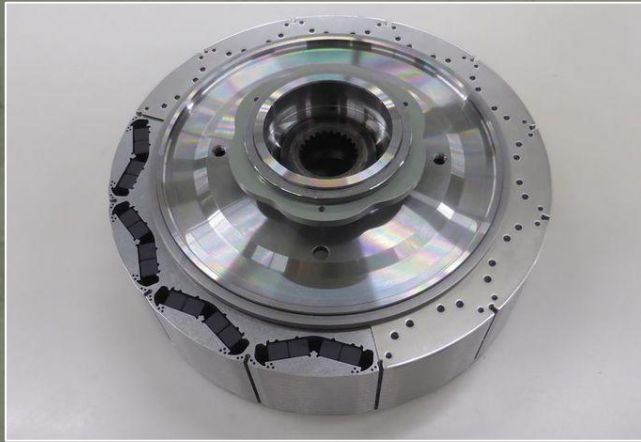
Pyrométallurgie



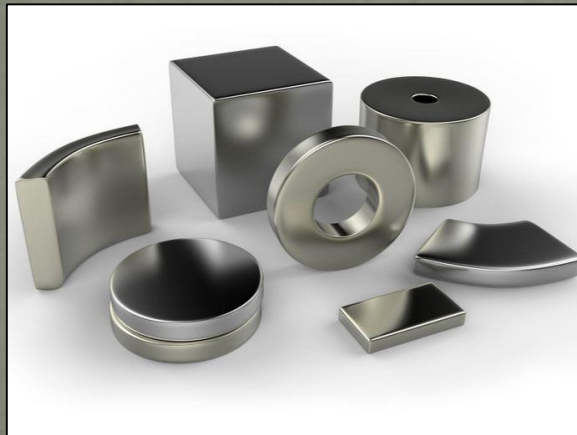
Hydrométallurgie



Recyclage des aimants



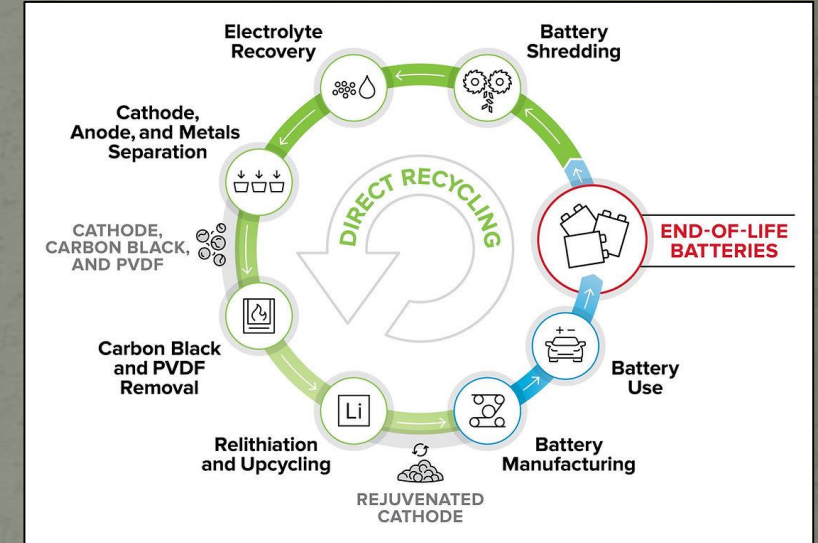
- Eolienne « offshore » : 1 t
- Voiture électrique : 1 kg
- Vélo électrique : 100 g



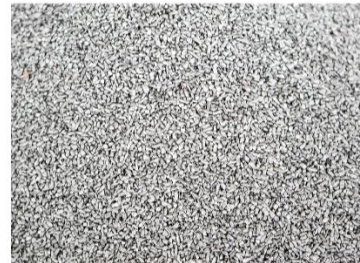
Recyclage des batteries Li-ion



- Pyroméallurgie
- Hydroméallurgie (« Blackmass »)
- Recyclage direct



ENVELOPPES



ALUMINIUM



CUIVRE

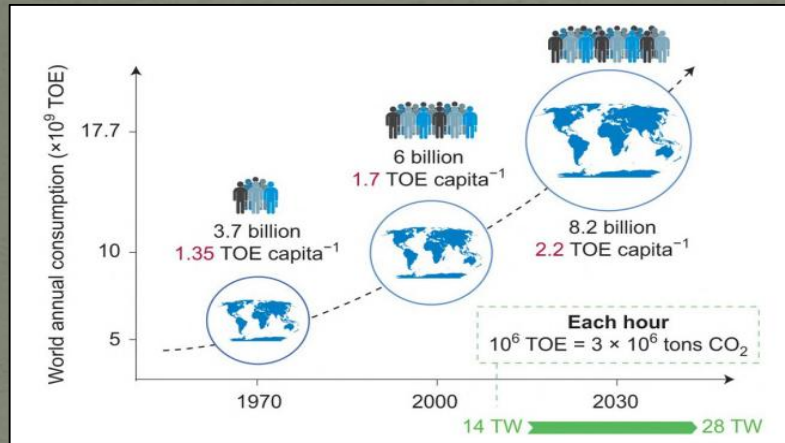


BLACKMASS

Lithium

Cobalt

La résilience!



Règle des 4 "R"

- Recycler
- Réutiliser
- Réduire sa production de déchets
- Réparer

Réduire sa consommation

- Eau (citerne, toilettes sèches)
- Energie électrique (journée sans courant)
- Energies fossiles (mobilité douce, chauffage au bois)
- Technologies (GSM!)

Modifier ses habitudes

- Acheter local
- Produire sa nourriture (potager)

Conclusions

- Les nouvelles technologies nécessitent de nombreux métaux rares.
- L'exploitation de ces métaux a des impacts environnementaux très négatifs.
- Le passage au numérique et la transition « écologique » nuisent à nos écosystèmes et à la santé humaine, parfois dans d'autres régions du monde.
- La seule solution reste la résilience et la décroissance économique.
- Nécessité absolue de revenir à un système de consommation plus humain et raisonné.