

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



Minéraux, nouvelles technologies et recyclage : Quels impacts environnementaux?

Prof. Frédéric Hatert

AGAB, le 6 février 2026

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

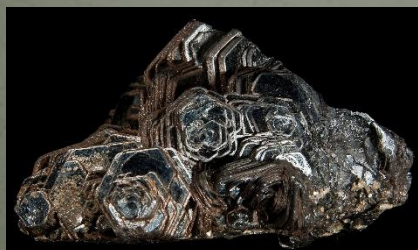
Pétrole, gaz, charbon

Ressources géologiques

Minerais

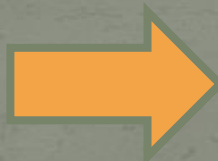
Gemmes
Métaux précieux

Minéraux industriels



La règle des 4 « R »

Recycler



Réduire sa production de déchets

Réparer

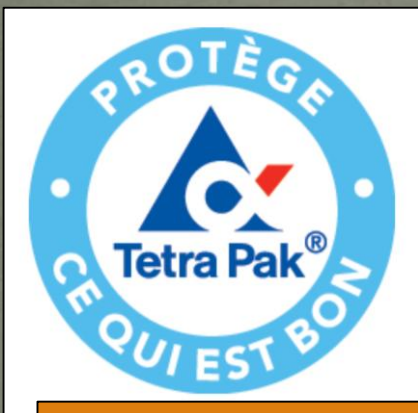


Réutiliser

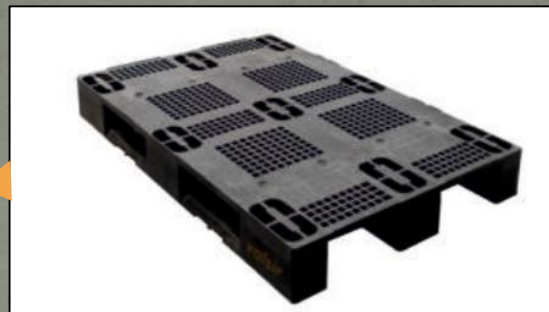


Valorisation

Recyclage et valorisation



Tétra Pak : Valorisable

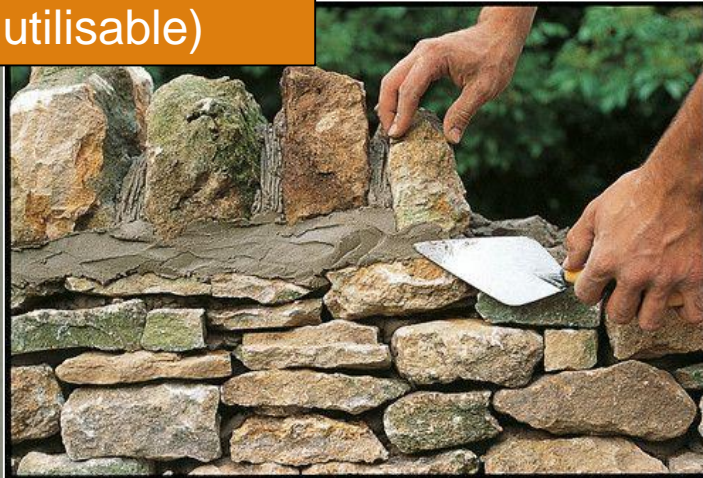


Papier : Recyclable

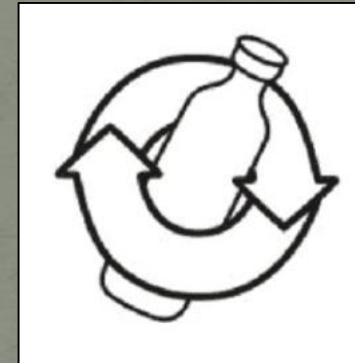


Recyclage des ressources géologiques

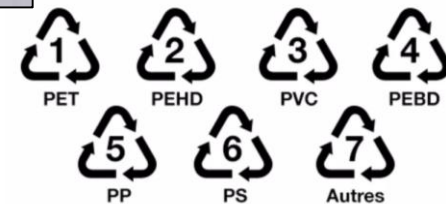
Matériaux de construction :
Valorisable (réutilisable)



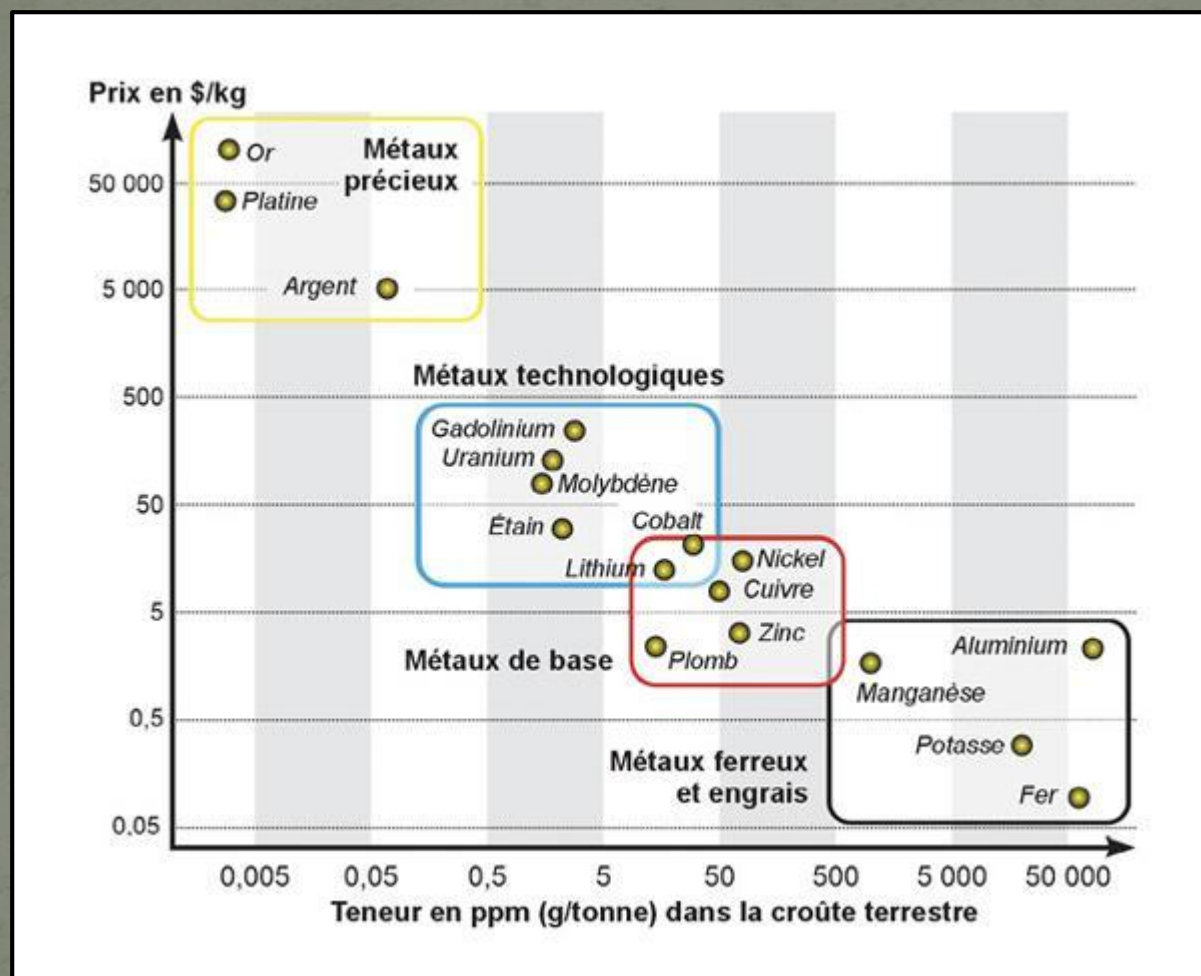
Minéraux industriels :
Verre, recyclable



Pétrole : Plastiques, valorisable



Abondance des métaux



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

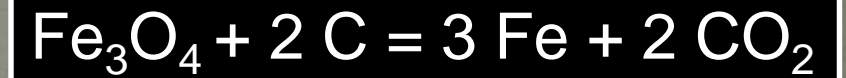
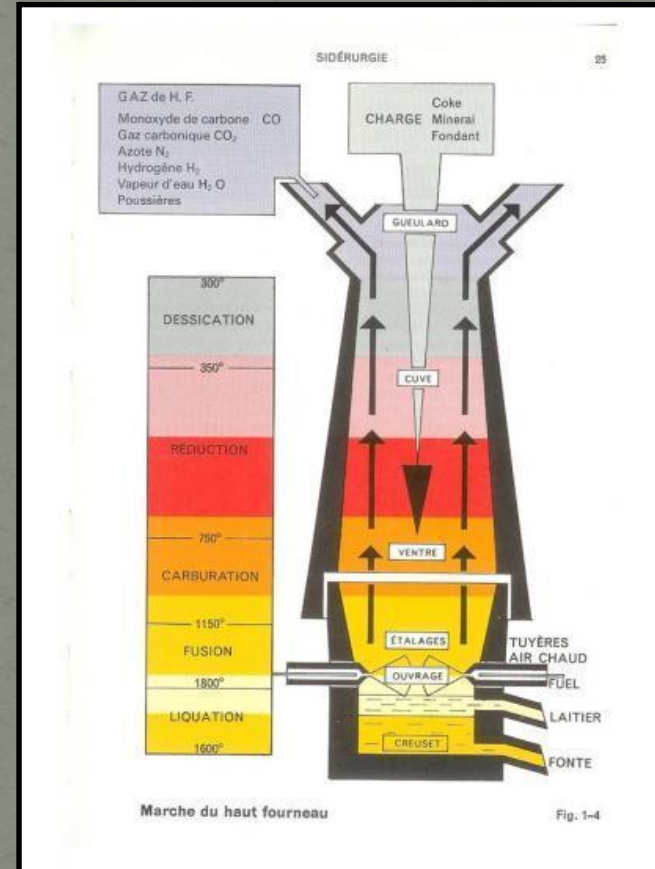
Les métaux de base : le fer



Hématite, Fe_2O_3



Magnétite, Fe_3O_4



Le cuivre



Malachite, $\text{Cu}^{2+}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$



- Katanga (Congo)
- Teneurs > 5 % Cu

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



Chalcopyrite, CuFeS_2



Chuquicamata, Chili

Le plomb et le zinc

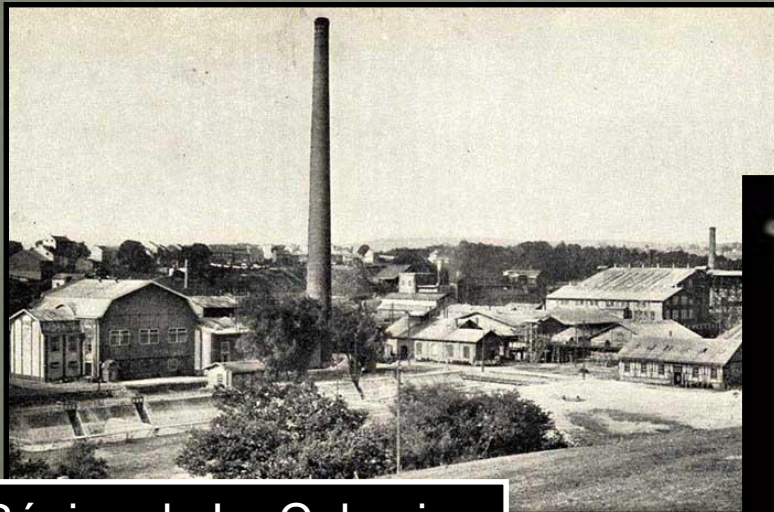


Sphalérite, (Zn,Fe)S



Galène, PbS

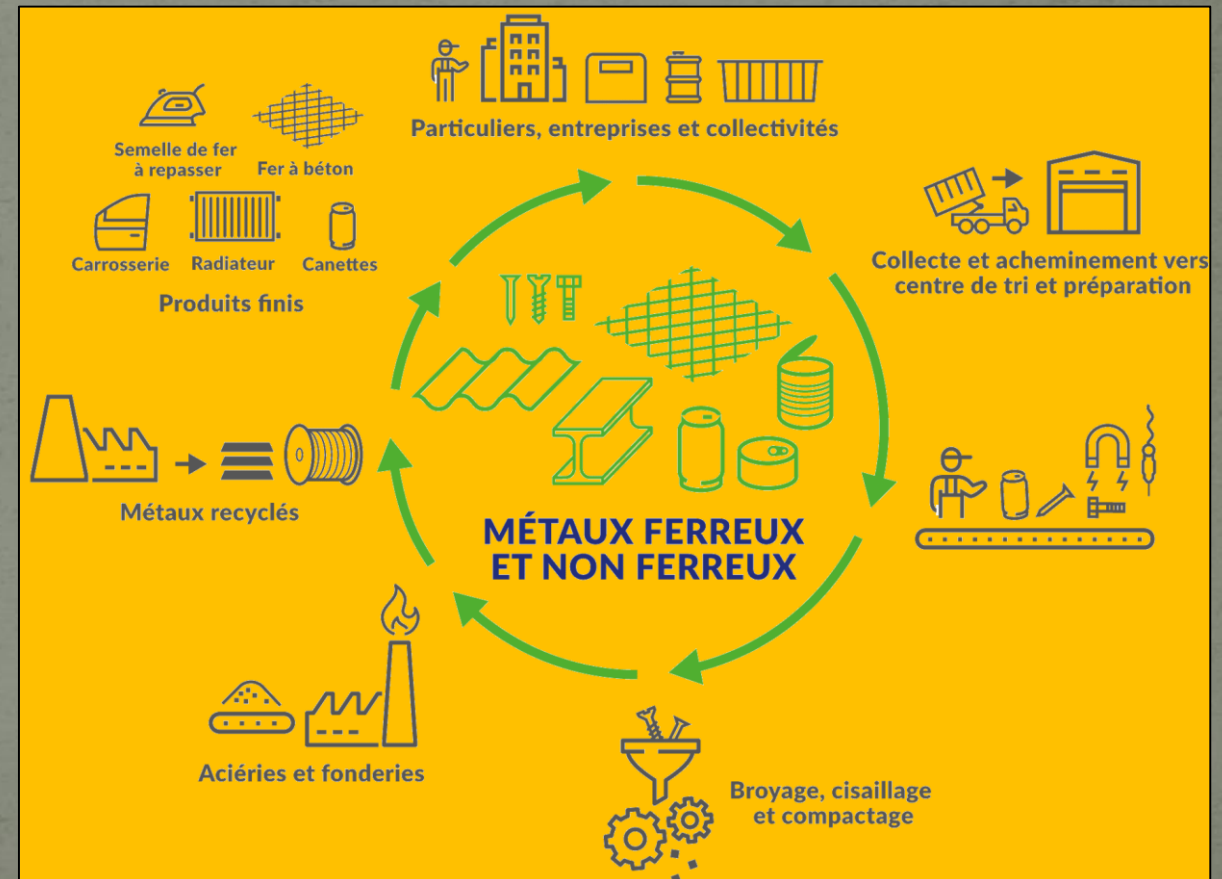
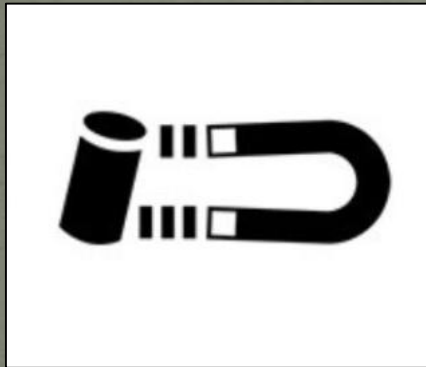
LA MINE DE PLOMB
DE LONGVILLY



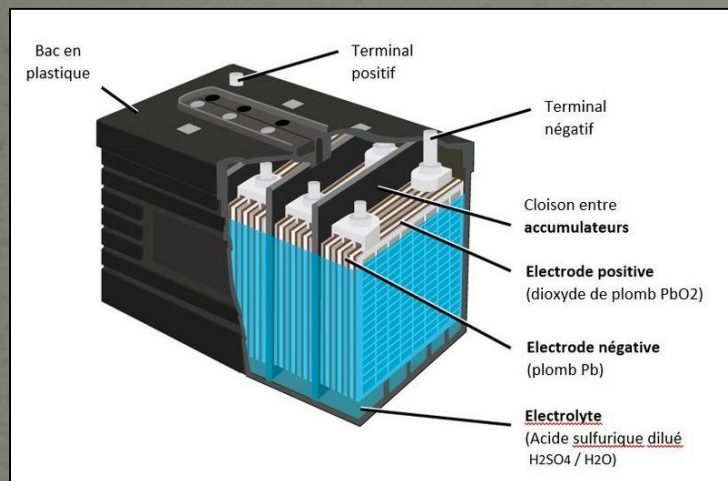
Région de La Calamine



Recyclage du fer



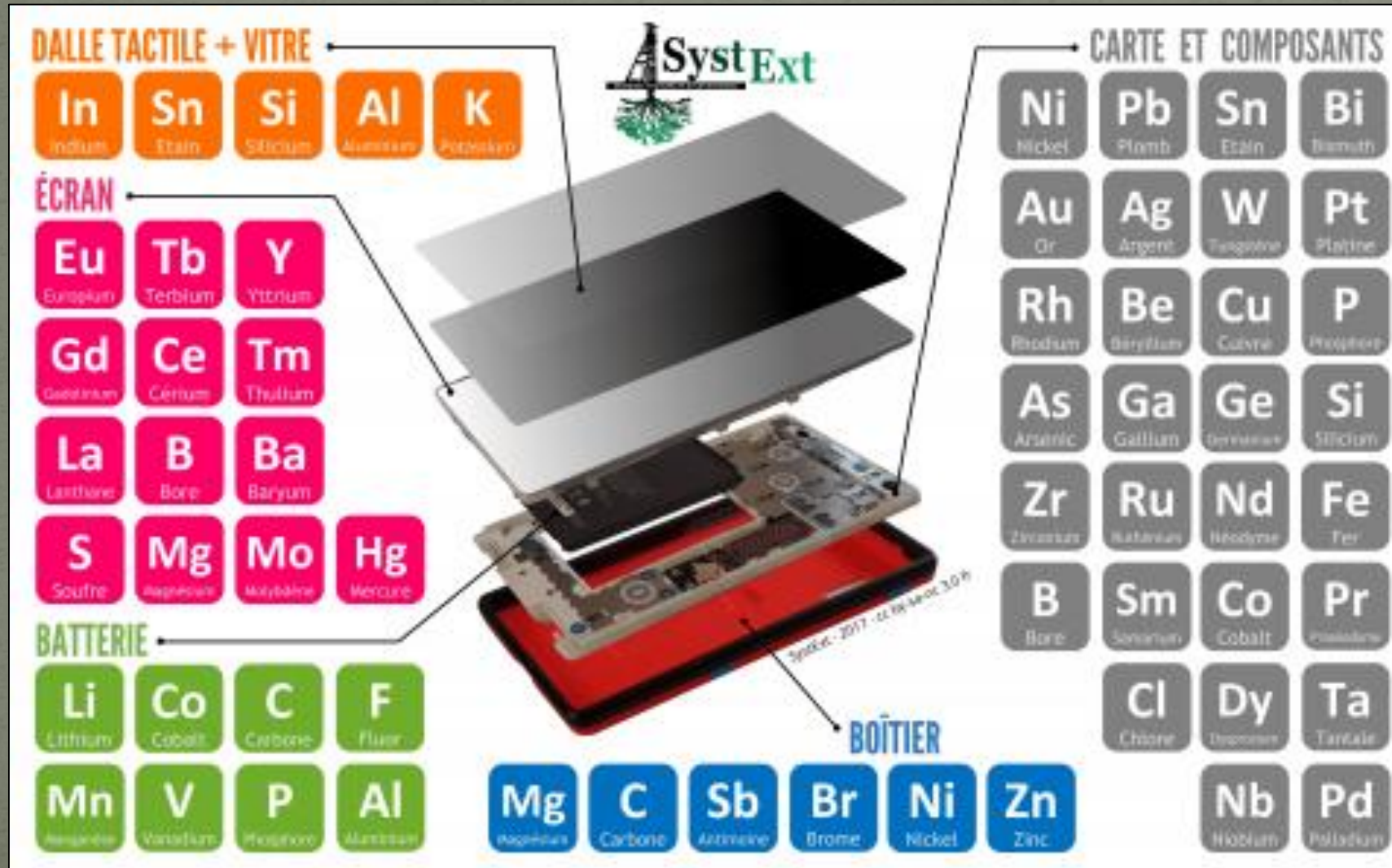
Recyclage des métaux de base



Zn



Métaux dans les smartphones



Batterie

Li, Co, Ni, Mn

Composants

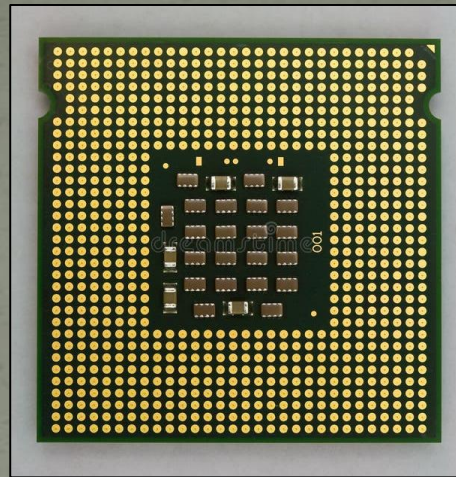
Circuits

Cu, Ta, Sn, Au

Aimants

Terres rares

L'or



Croûte terrestre: 5 mg/T



Ordinateur



0,5 g d'or



~ 500 kg de roche



Le tantale

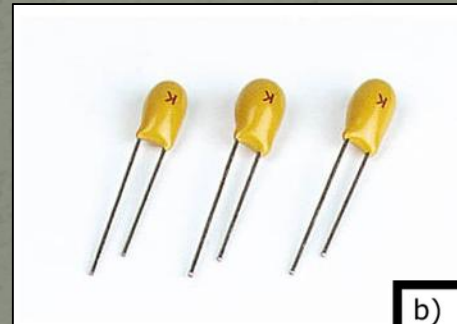


Columbo-tantalite
 $(\text{Fe, Mn})(\text{Nb, Ta})_2\text{O}_6$

Ordinateur



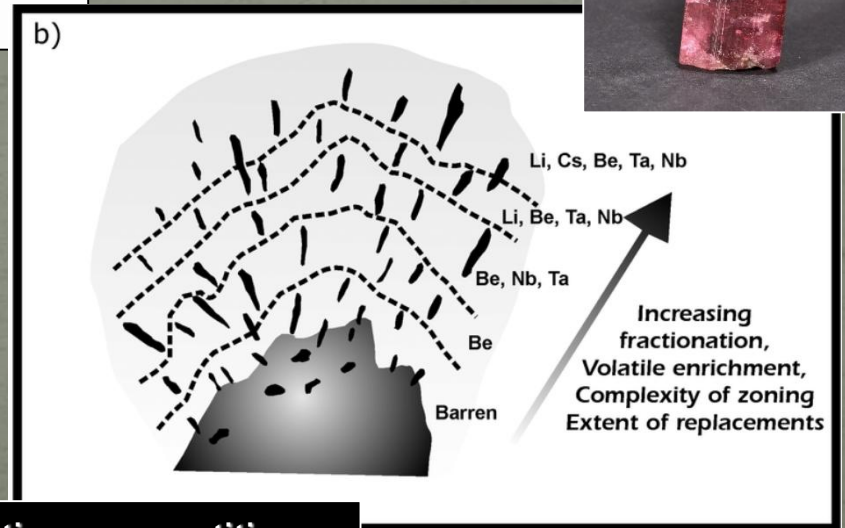
1,7 g de tantale



Elbaïte

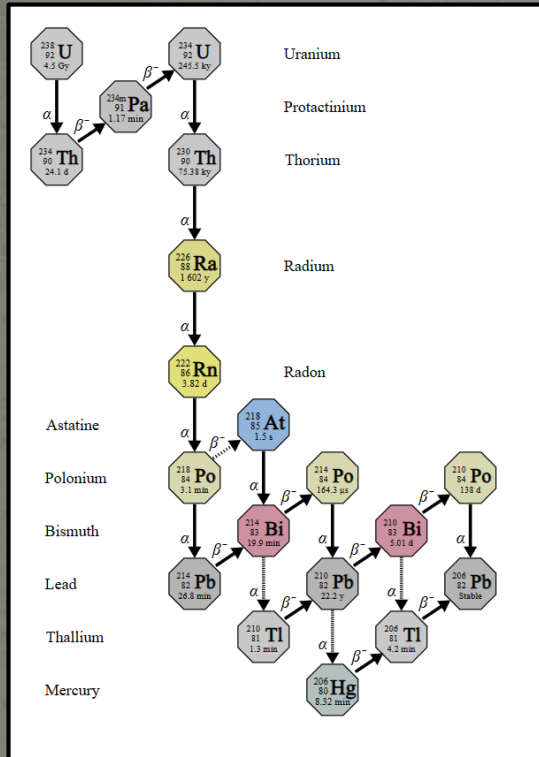


- Australie, Chine, Brésil, RDC (Kivu)
- Croûte terrestre: 1,8 g/T
- Minerais exploitables: 0,05 % Ta
- Gisements : pegmatites granitiques

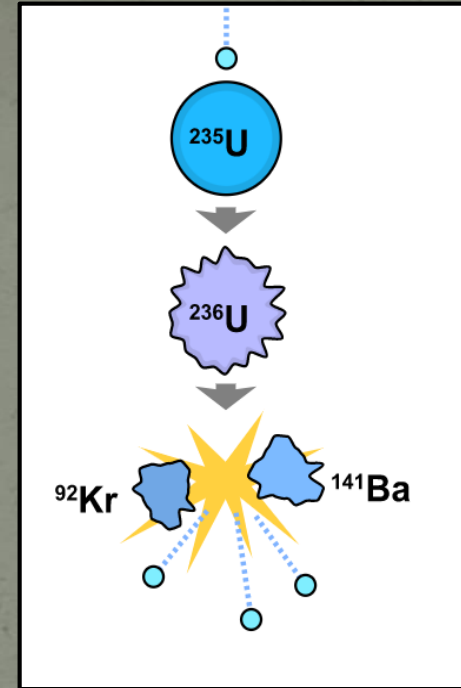
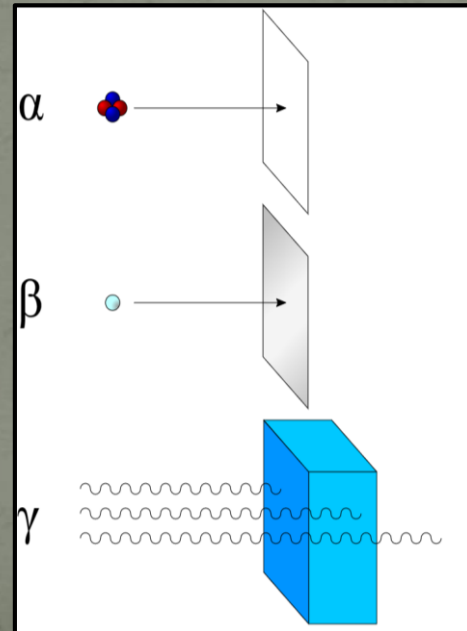


Zonation pegmatitique

L'uranium



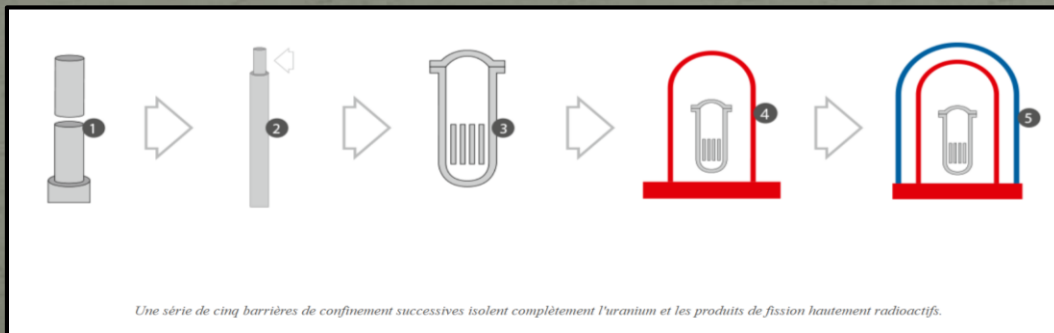
Alpha: 2 protons, 2 neutrons
Béta: Electrons ou positrons



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



L'énergie nucléaire

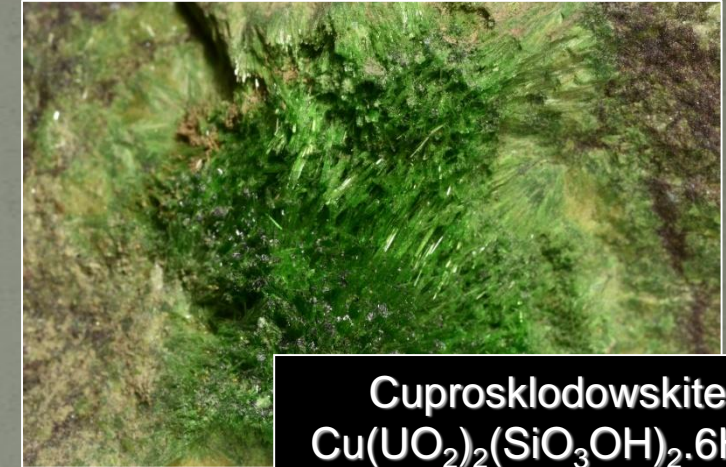


Les minéraux d'uranium

Shinkolobwe, Katanga



Uraninite, UO_2

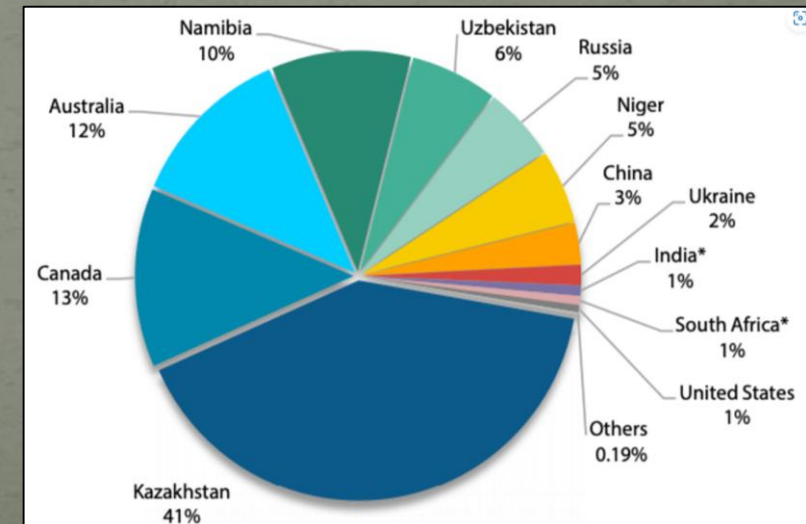


Cuprosklodowskite,
 $Cu(UO_2)_2(SiO_3OH)_2 \cdot 6H_2O$



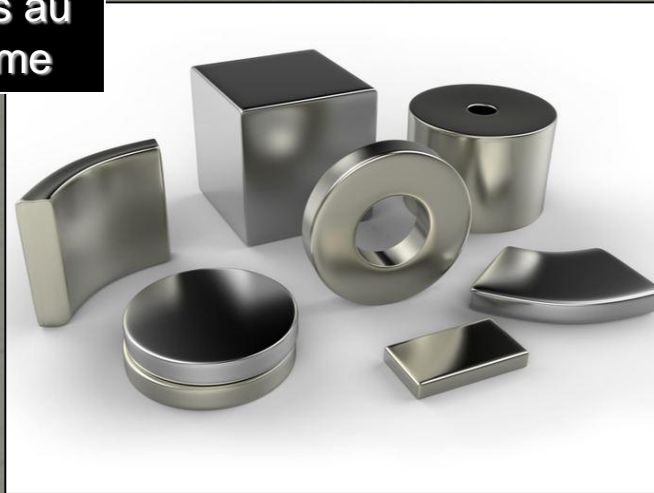
Torbernite,
 $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 12H_2O$

Torbernite - Musonoi
Coll. Fr. Coune © 2009 R. Warin



Energie éolienne

Aimants au
néodyme

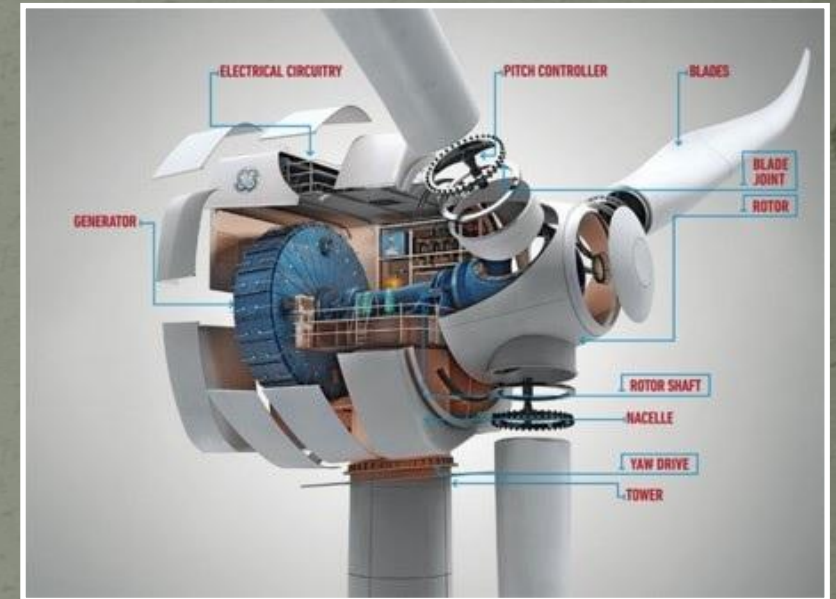
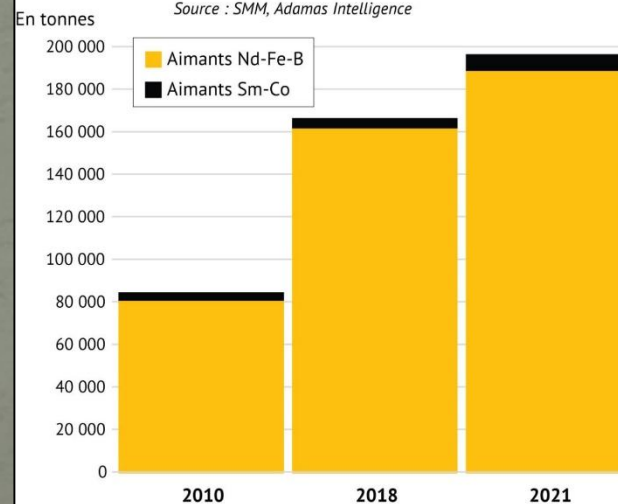


Eolienne moyenne



200 à 300 kg Nd

Augmentation des capacités chinoises de production d'aimants permanents



Les terres rares



Bastnäsite-(Ce),
 $Ce(CO_3)F$

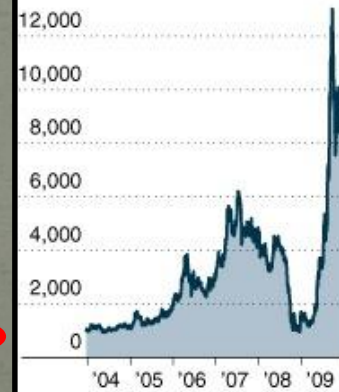


Betting on Rare Earths

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 4																	10 Ne 18			
3 Na 11 Mg 12 24	3 Sc 21	4 Ti 22	5 V 23	6 Cr 24	7 Mn 25	8 Fe 26	9 Co 27	10 Ni 28	11 Cu 29	12 Zn 30	13 Ga 31	14 Ge 32	15 As 33	16 Se 34	17 Br 35	18 Kr 36				
4 K 19 Ca 20	21 Sc 44	22 Ti 46	23 V 51	24 Cr 52	25 Mn 55	26 Fe 56	27 Co 59	28 Ni 58	29 Cu 63	30 Zn 65	31 Ga 69	32 Ge 72	33 As 75	34 Se 79	35 Br 79	36 Kr 84				
5 Rb 37 Sr 38	39 Y 88	40 Zr 91	41 Nb 93	42 Mo 96	43 Tc 98	44 Ru 101	45 Rh 102	46 Pd 106	47 Ag 108	48 Cd 112	49 In 114	50 Sn 118	51 Sb 121	52 Te 127	53 I 127	54 Xe 131				
6 Cs 55 Ba 56	57-71 Lanthanides	72 Hf 178	73 Ta 182	74 W 184	75 Re 187	76 Os 190	77 Ir 192	78 Pt 195	79 Au 197	80 Hg 201	81 Tl 204	82 Pb 207	83 Bi 209	84 Po [209]	85 At [210]	86 Rn [222]				
7 Fr 87 Ra 88	89-103 Actinides	104 Rf [261]	105 Db [262]	106 Sg [263]	107 Bh [264]	108 Hs [265]	109 Mt [266]	110 Ds [267]	111 Rg [268]	112 Cn [269]	113 Nh [270]	114 Fl [271]	115 Lv [272]	116 Mc [273]	117 Ts [274]	118 Og [276]				
<table border="0"> <tr> <td>57-71 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</td> <td>72-103 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</td> <td>104-118 Rf 105 Db 106 Sg 107 Bh 108 Hs 109 Mt 110 Ds 111 Rg 112 Cn 113 Nh 114 Fl 115 Lv 116 Mc 117 Ts 118 Og</td> </tr> </table>																		57-71 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	72-103 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	104-118 Rf 105 Db 106 Sg 107 Bh 108 Hs 109 Mt 110 Ds 111 Rg 112 Cn 113 Nh 114 Fl 115 Lv 116 Mc 117 Ts 118 Og
57-71 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	72-103 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	104-118 Rf 105 Db 106 Sg 107 Bh 108 Hs 109 Mt 110 Ds 111 Rg 112 Cn 113 Nh 114 Fl 115 Lv 116 Mc 117 Ts 118 Og																		
<p>Métaux: Alcalins, Alcalino-terreux, Lanthanides, Actinides, Métaux de transition, Métaux pauvres, Métaux lourds, Autres métaux, Halogènes, Gaz nobles, Non classés</p> <p>primordial, d'autres éléments synthétiques</p>																				

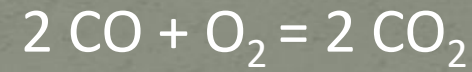
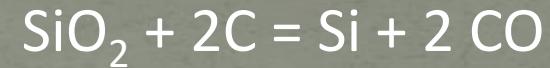


Monazite-(Ce),
 $CePO_4$

Energie photovoltaïque



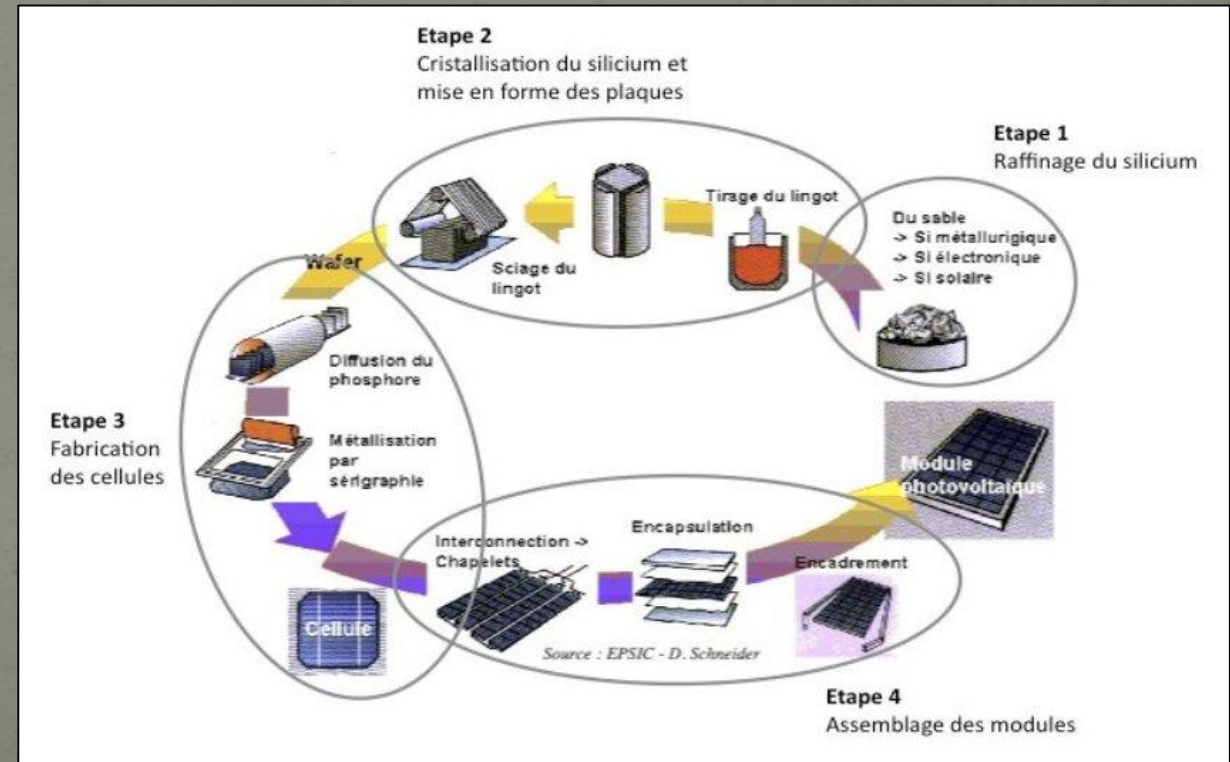
Réduction de la silice par le carbone à 1700°C :



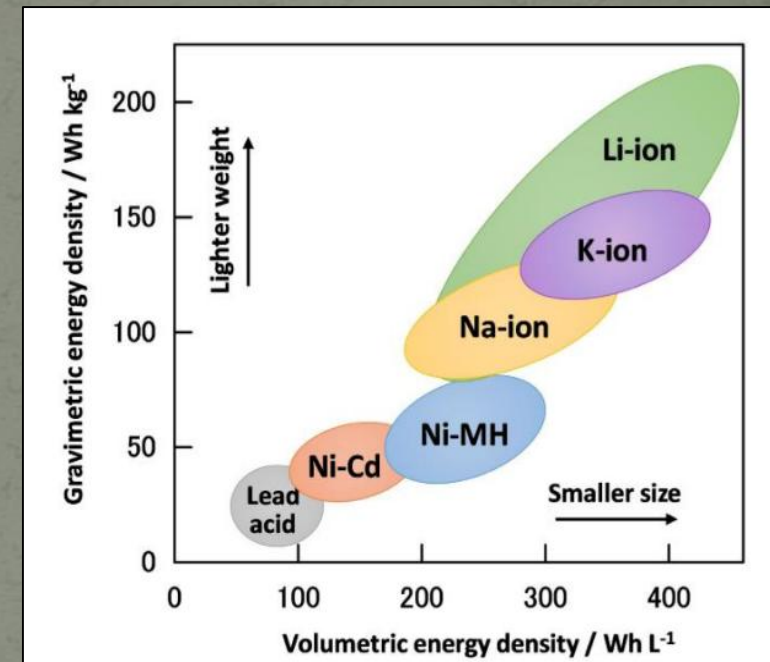
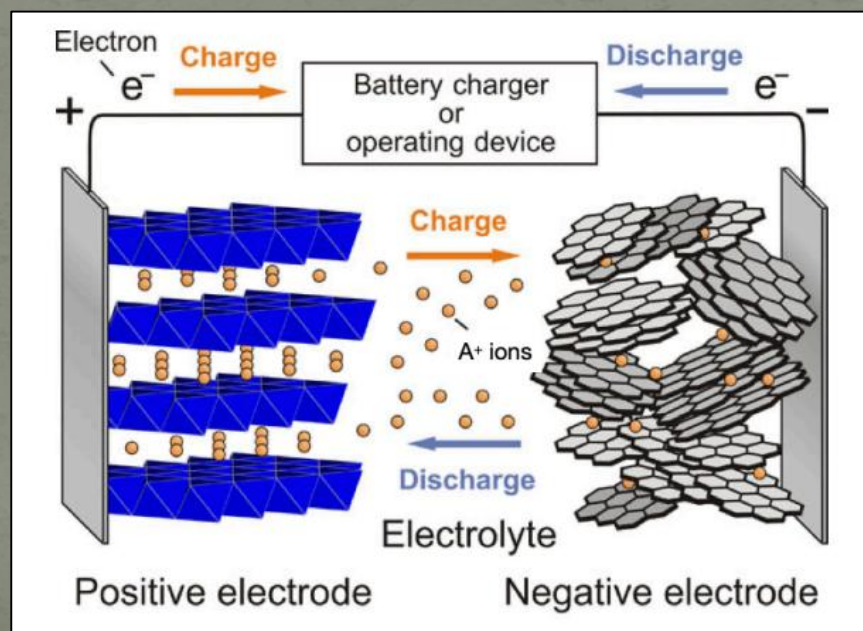
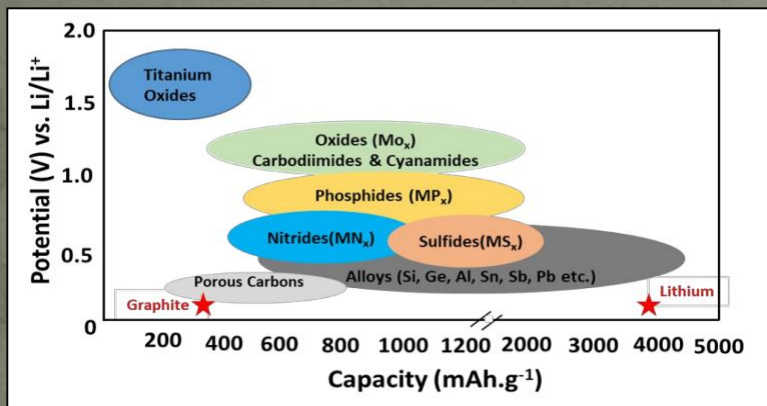
- Transformation directe d'énergie solaire en énergie électrique
- Silicium dopé « P » ou « N »



Lingots de silicium



Batteries Li-ion: principe



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

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 decantation
- 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)

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 »?



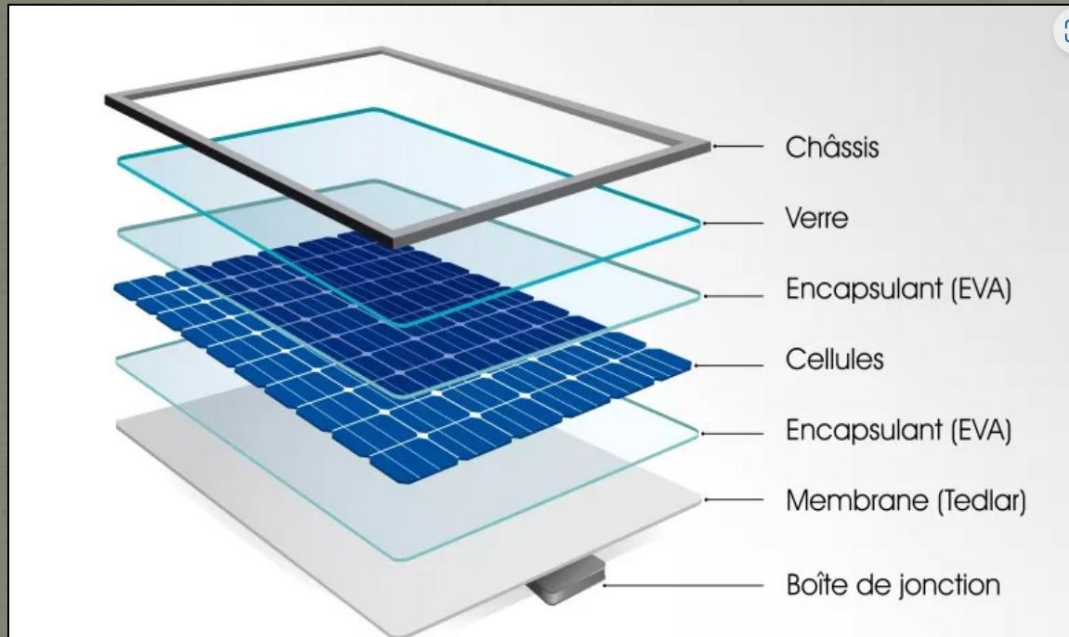
Lloyds' Surjagarh,
mine « verte », Inde

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



‘Greenwashing’ of the mining industry

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)

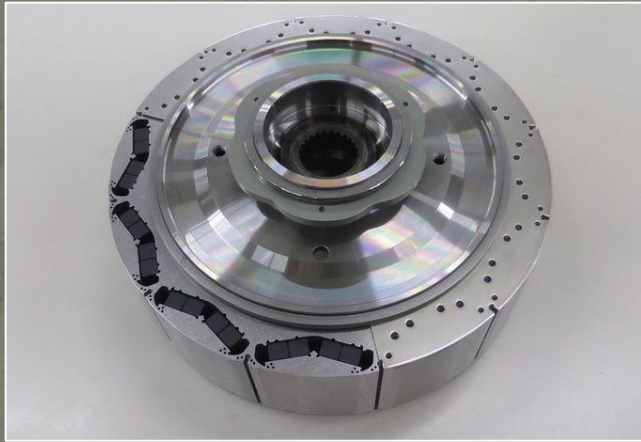


Broyage (Matériaux,
remblais)

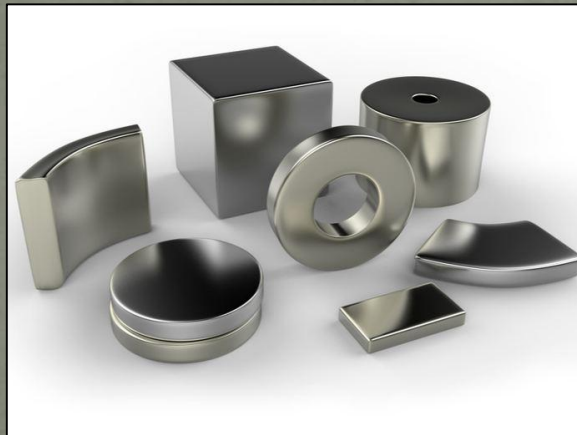


Incinération
(Cimenterie)

Recyclage des aimants



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



Recyclage des composants électroniques

Afrique (Ghana, Nigéria):

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



Pyrométallurgie



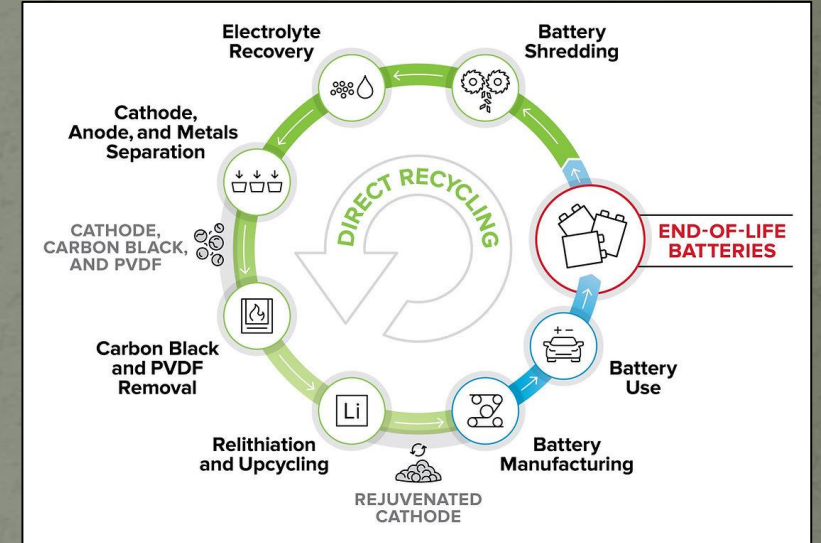
Hydrométallurgie



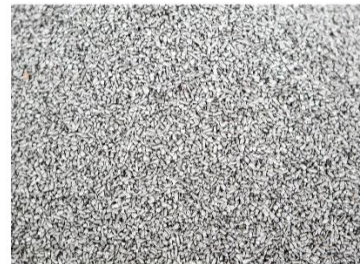
Recyclage des batteries Li-ion



- Pyrométallurgie
- Hydrométallurgie (« Blackmass »)
- Recyclage direct



ENVELOPPES



ALUMINIUM



CUIVRE

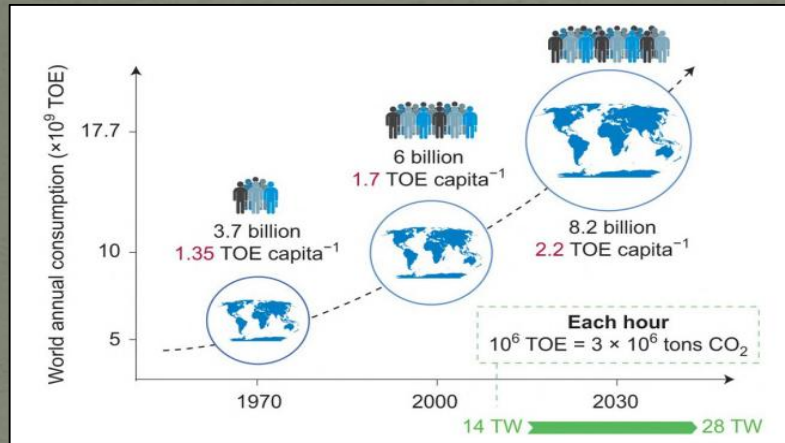


BLACKMASS

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.