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

# Les minéraux et les nouvelles technologies

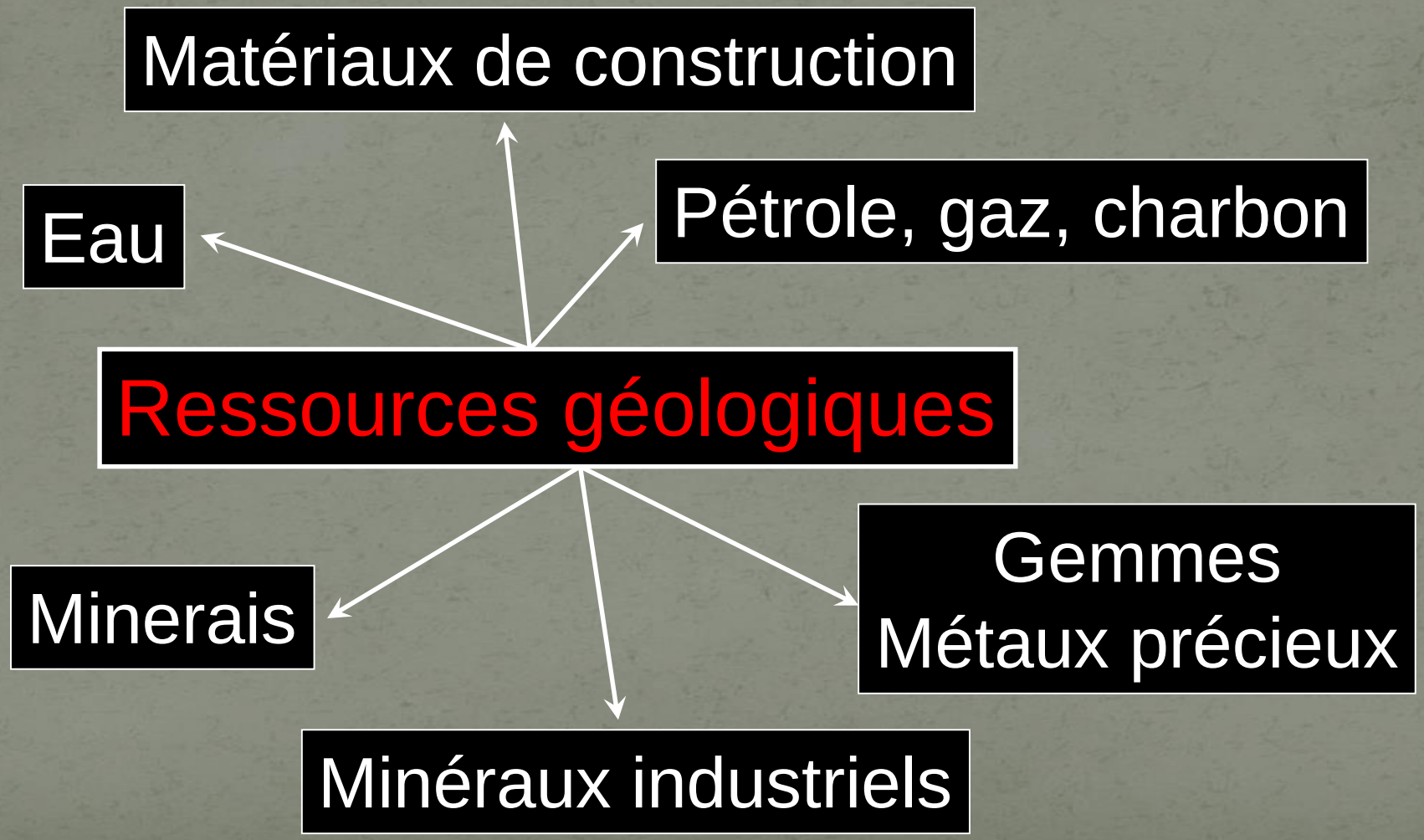
**Prof. Frédéric Hatert**

Liège, le 9 novembre 2025

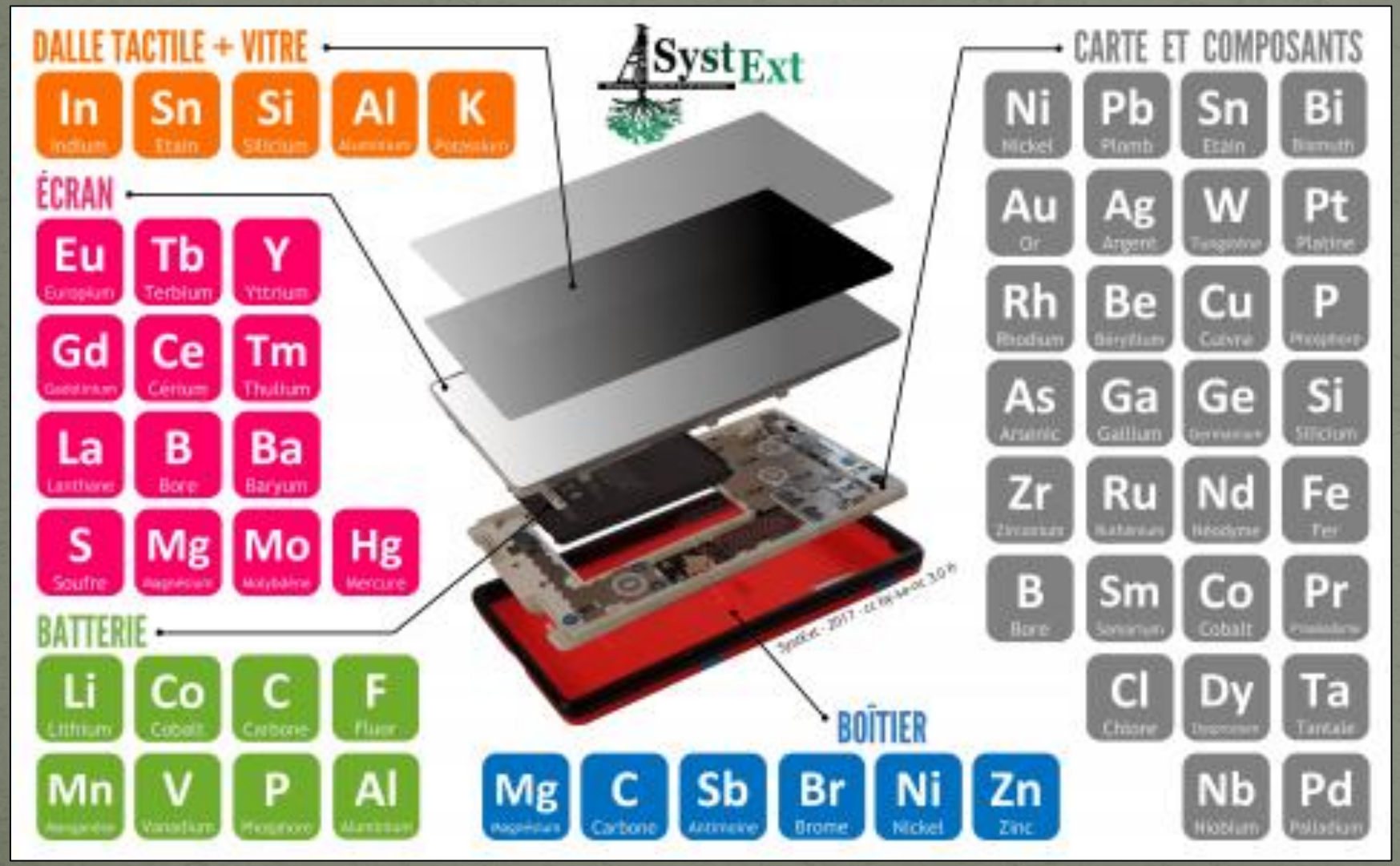
# Plan de l'exposé

1. Introduction
2. Ordinateurs et smartphones
3. Production électrique
4. Stockage énergétique
5. Problèmes environnementaux

# Ressources géologiques



# Smartphones et ordinateurs




Batterie
Li, Co, Ni, Mn

Composants
Circuits
Cu, Ta, Sn, Au

Aimants
Terres rares

# Le cuivre

Malachite, $Cu^{2+}{}_2(CO_3)(OH)_2$

Azurite, $Cu^{2+}{}_3(CO_3)_2(OH)_2$

Cuivre natif, Cu

Chalcopyrite, $CuFeS_2$

# Gisements de cuivre

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

- Katanga (Congo)
- UMHK
- Gécamines depuis 1967
- Teneurs > 5 % Cu
- Sulfures et malachite

Chuquicamata, Chili

# L'or

- Afrique du Sud, Indonésie, Canada, Chine
- Croûte terrestre: 5 mg/T
- Minerais exploitables: quelques g/T

Ordinateur

↓

0,5 g d'or

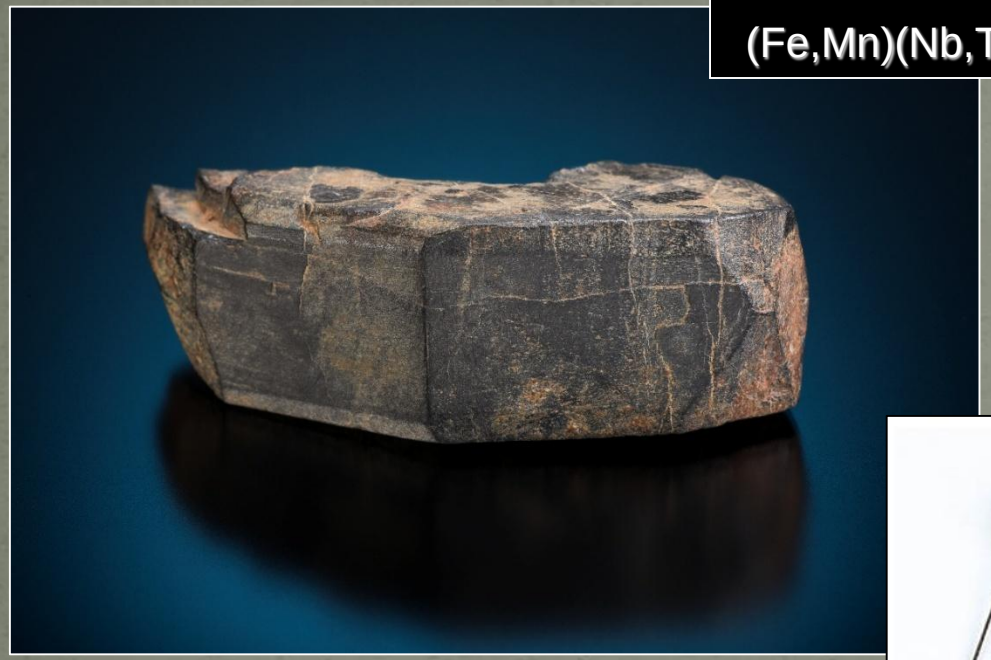
↓

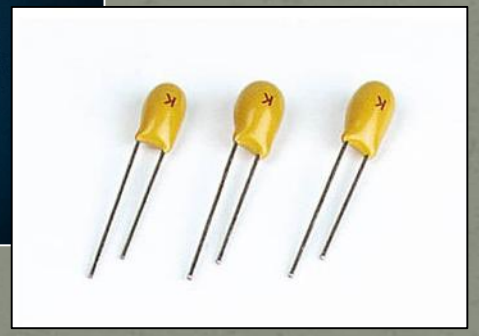
~ 500 kg de roche

# Le tantale

Columbo-tantalite

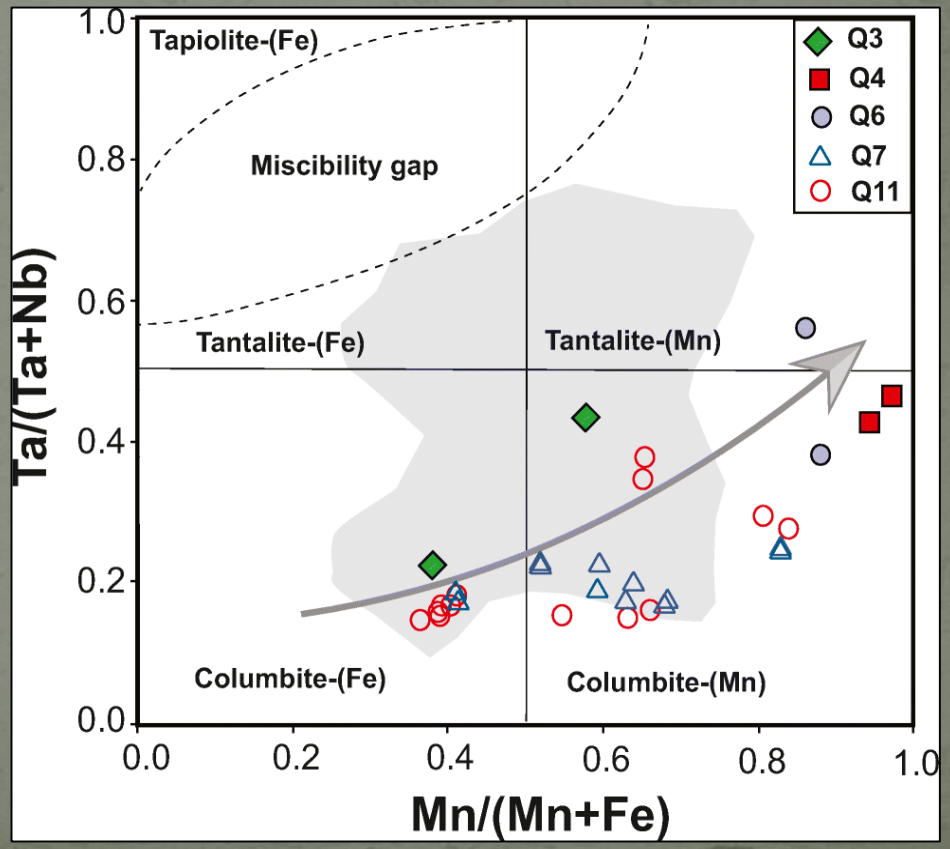
$(Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$





Ordinateur

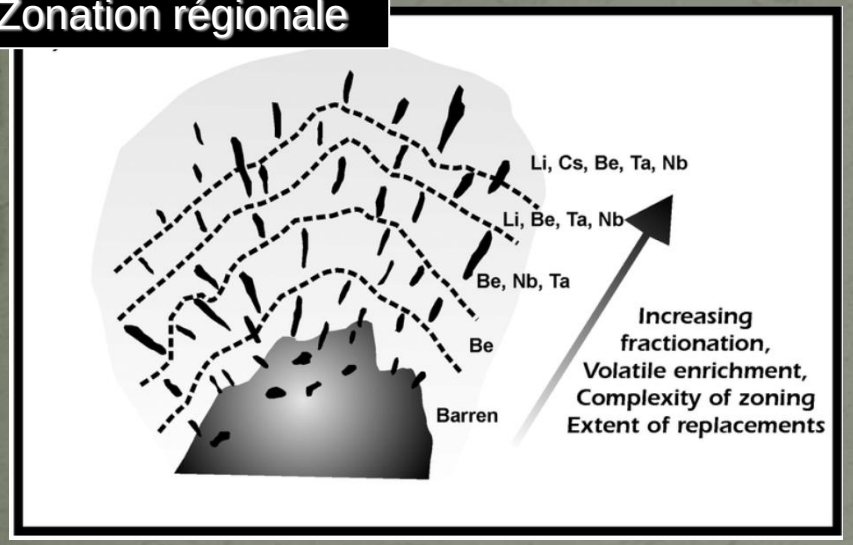
1,7 g de tantale




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

# Les pegmatites granitiques

Zonation régionale




Texture graphique

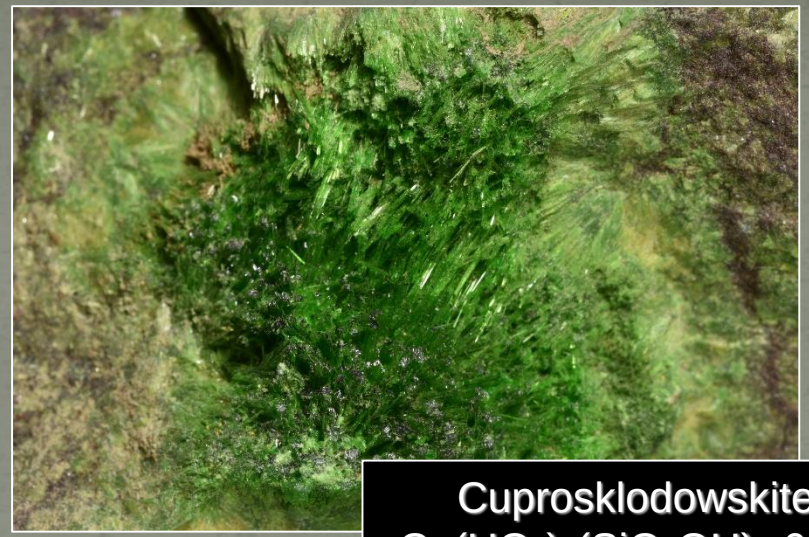
Elbaïte

- Eléments incompatibles (Li, Be, Ta)
- Se concentrent dans le magma résiduel
- Zonation régionale
- Textures caractéristiques
- Gemmes remarquables

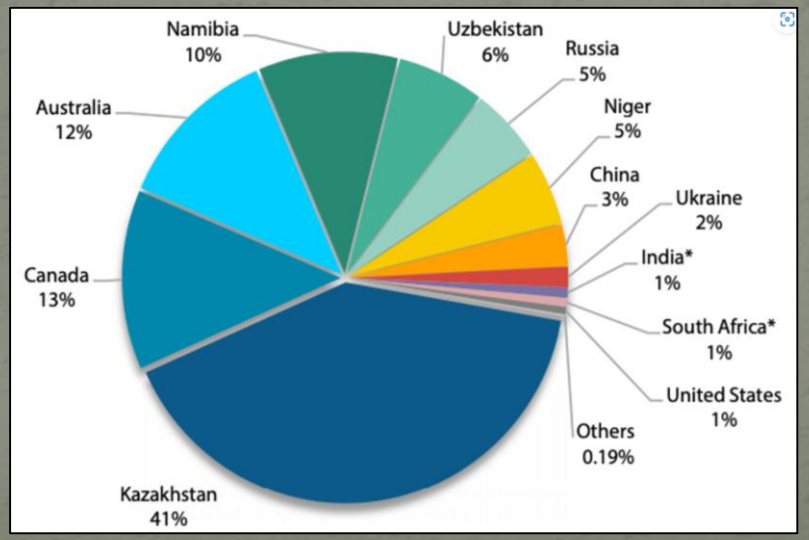
Albite lamellaire
« Cleavelandite »

# L'uranium

Uraninite, $UO_2$



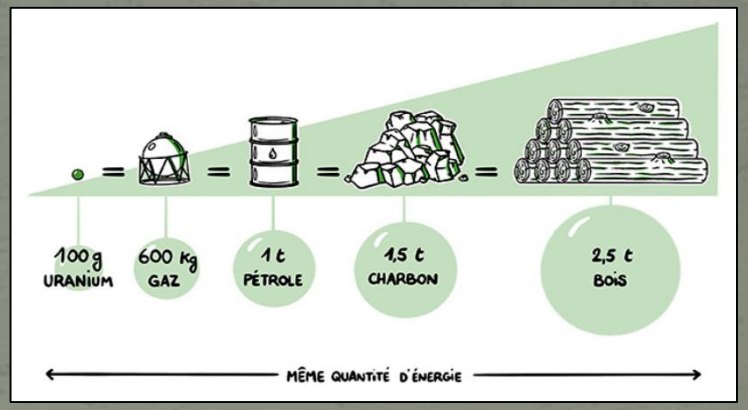
Cuprosklodowskite, $Cu(UO_2)_2(SiO_3OH)_2.6H_2O$

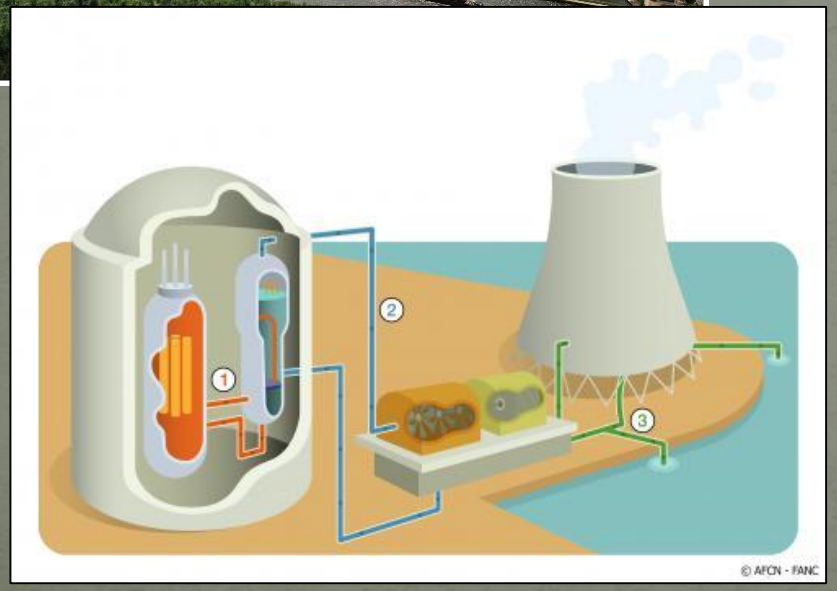


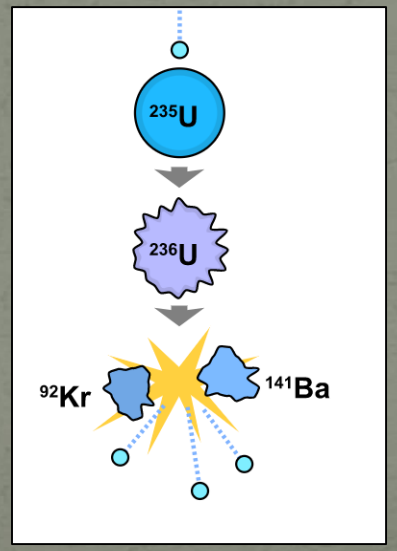
Torbernite, $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2.12H_2O$

# Energie nucléaire

$$E = mc^2$$



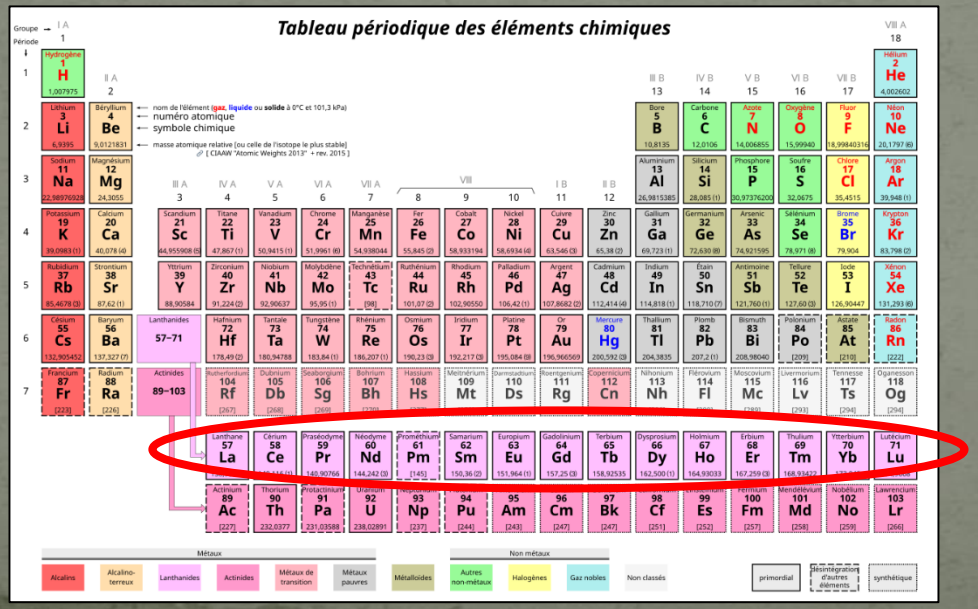



# Les terres rares

Bastnäsite-(Ce), $Ce(CO_3)F$

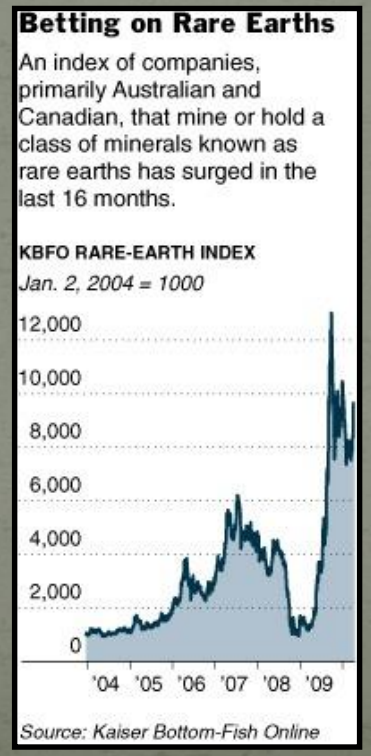
Xénotime-(Y), $YPO_4$

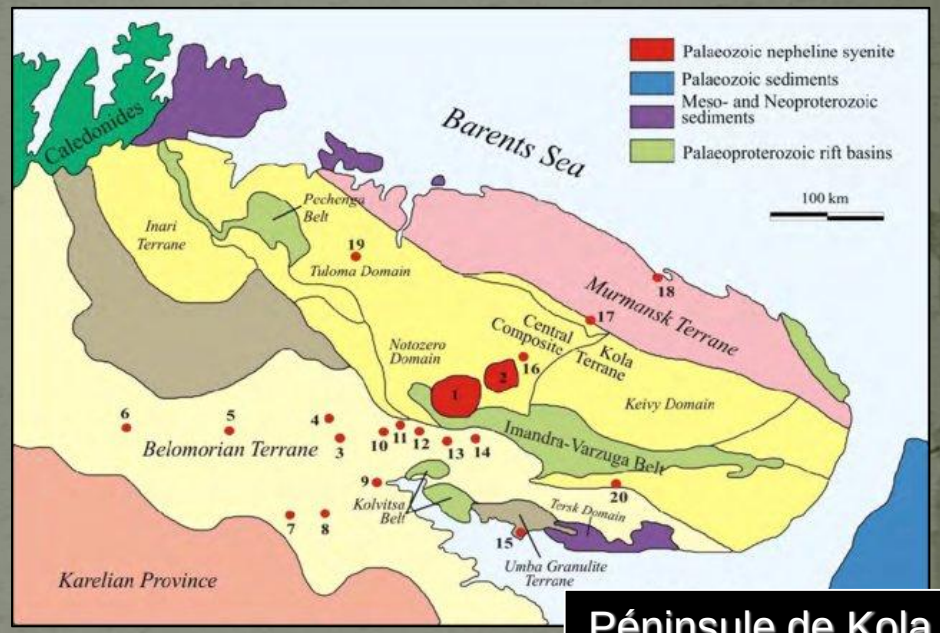


Monazite-(Ce), $CePO_4$

# Roches alcalines et carbonatites

- Carbonatites = roche ultrabasique
- Terres rares légères
- Mountain Pass (USA), Kovdor (Russie)
- Minéraux principaux : bastnäsite-(Ce), monazite-(Ce)



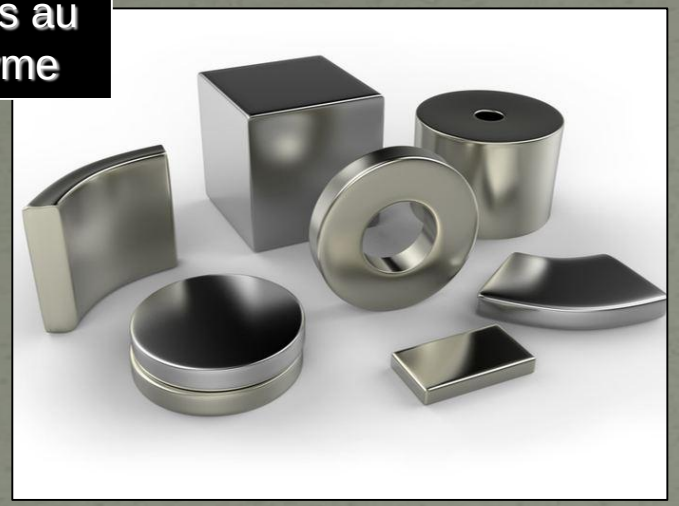




Péninsule de Kola

- Roches alcalines
- Riches en Na et K
- Péninsule de Kola (Russie)

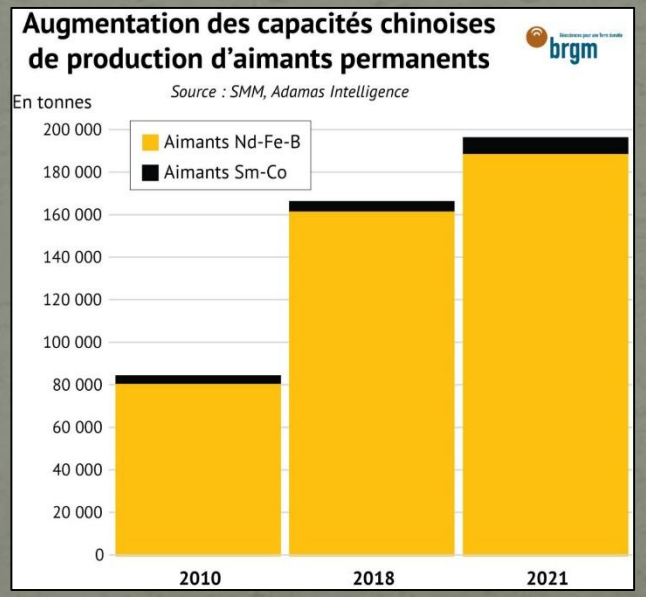
# Energie éolienne

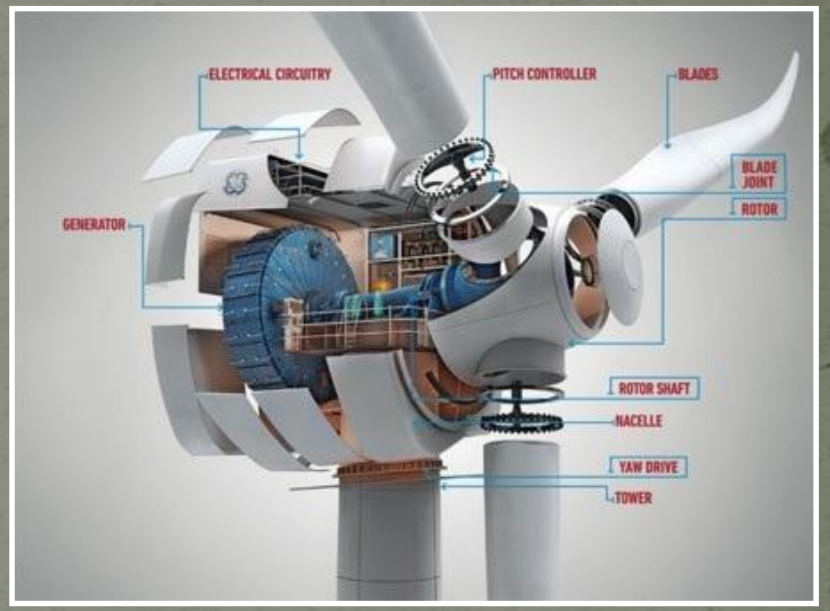
Aimants au néodyme



Eolienne moyenne

200 à 300 kg Nd



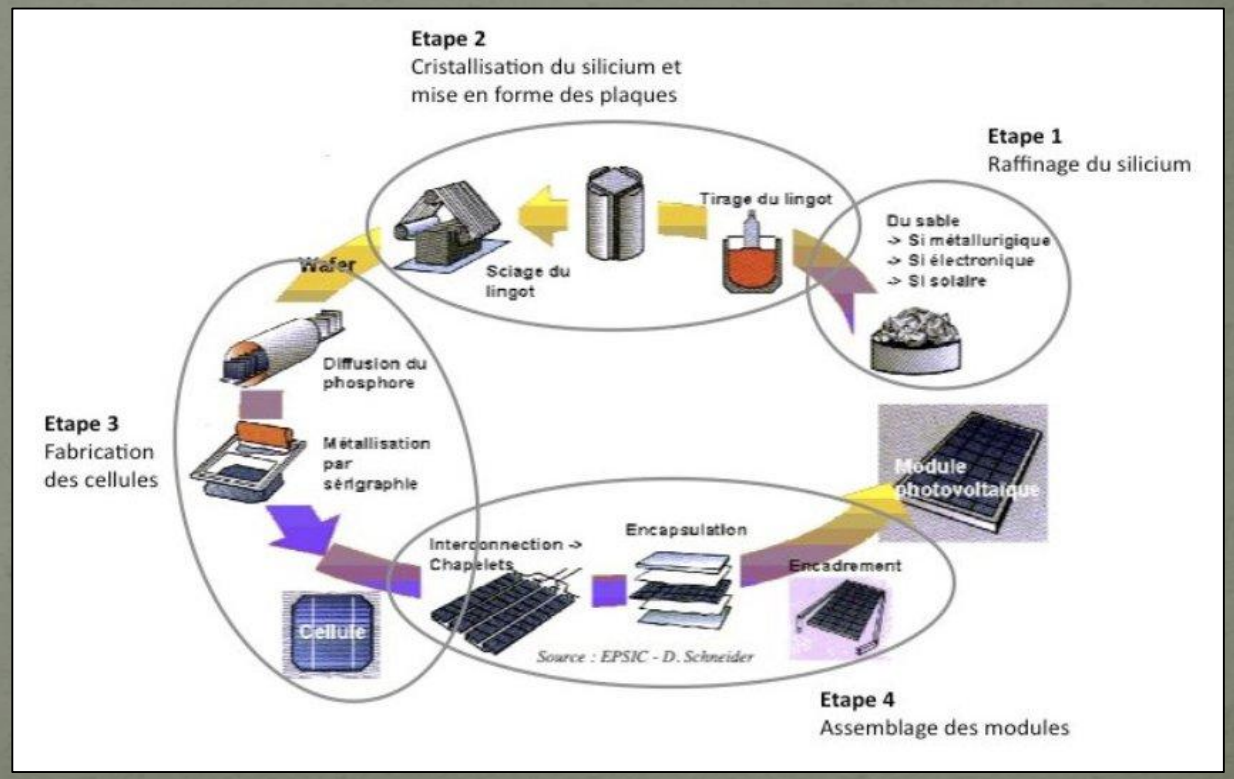



# Energie photovoltaïque

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

$$SiO_2 + 2C = Si + 2\,CO$$

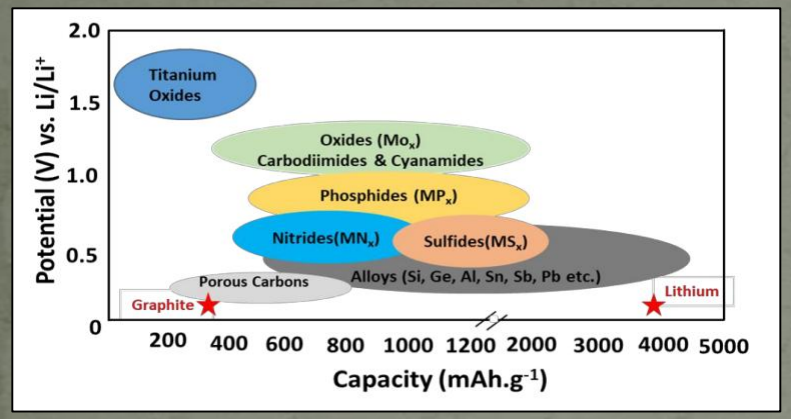
$$2\,CO + O_2 = 2\,CO_2$$

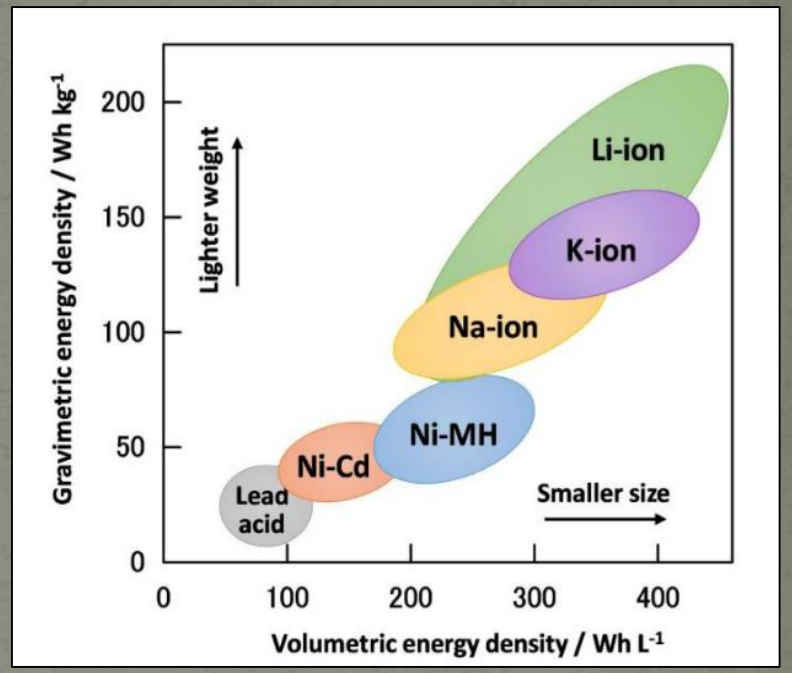


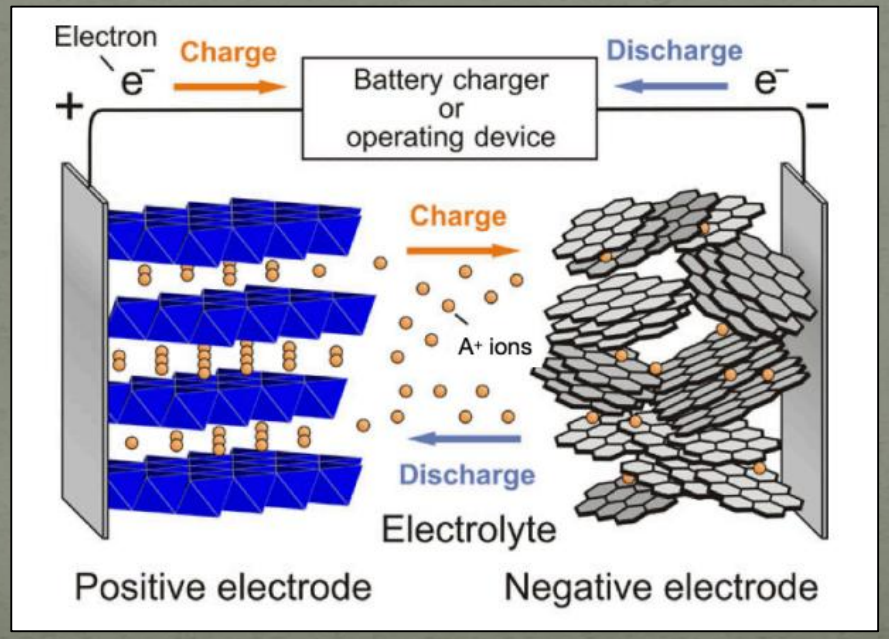

- Transformation directe d'énergie solaire en énergie électrique
- Silicium dopé « P » ou « N »

Lingots de silicium

# Batteries Li-ion: principe






- Anode : graphite
- Cathode: $LiCoO_2$ ou $LiFe(PO_4)$

# Gisements de lithium

Spodumène (Kunzite)

$LiAlSi_2O_6$

Pétalite

$LiAlSi_4O_{10}$

Salar du Chili

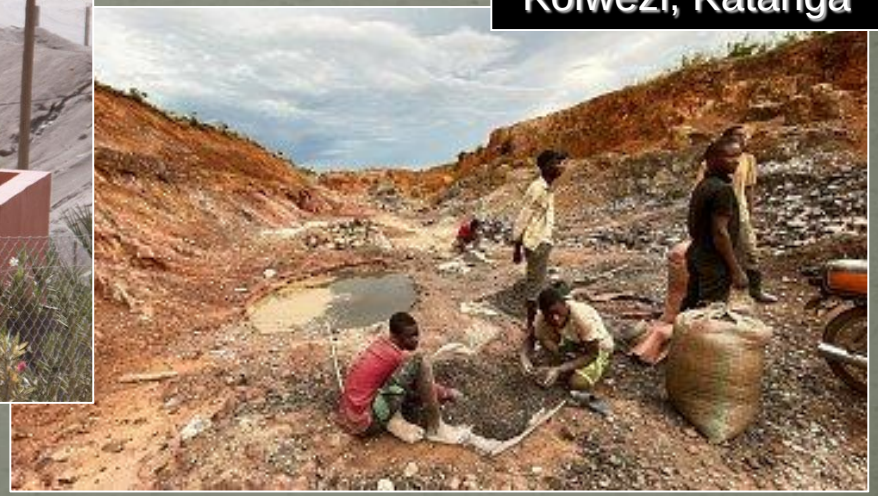
- Chili (33 %) : évaporites (LiCl)
- Australie (22 %) : pegmatites

# Le cobalt

Erythrite, $Co_3(AsO_4)_2.8H_2O$

Skutterudite, $(Co,Ni)As_3$

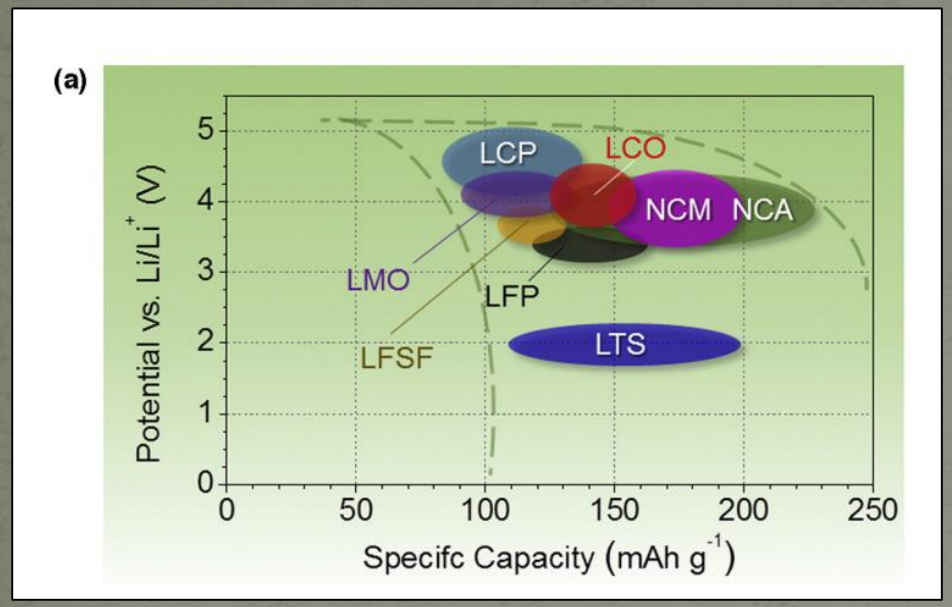
Bou Azzer, Maroc

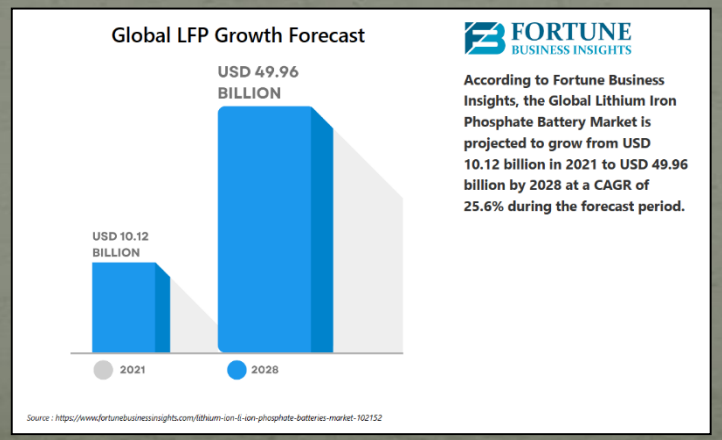


Kolwezi, Katanga

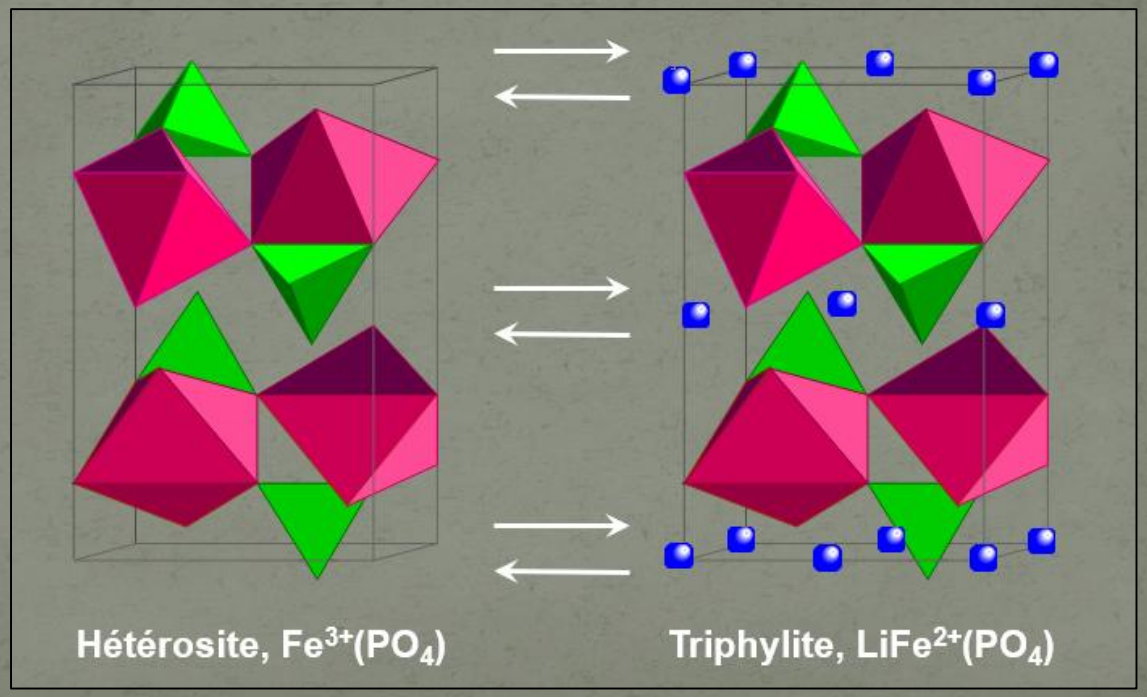
- Gisements rares
- Toxique pour l'environnement

# Batteries LFP



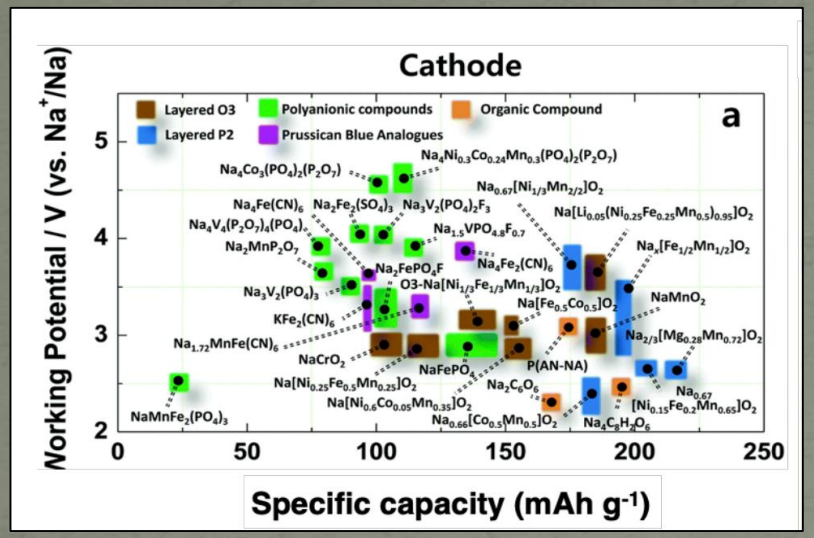




- Première commercialisation par Phostech Lithium (2001, Québec)
- Majeure partie de la production actuelle en Chine
- Explosion du marché dans les 10 années à venir



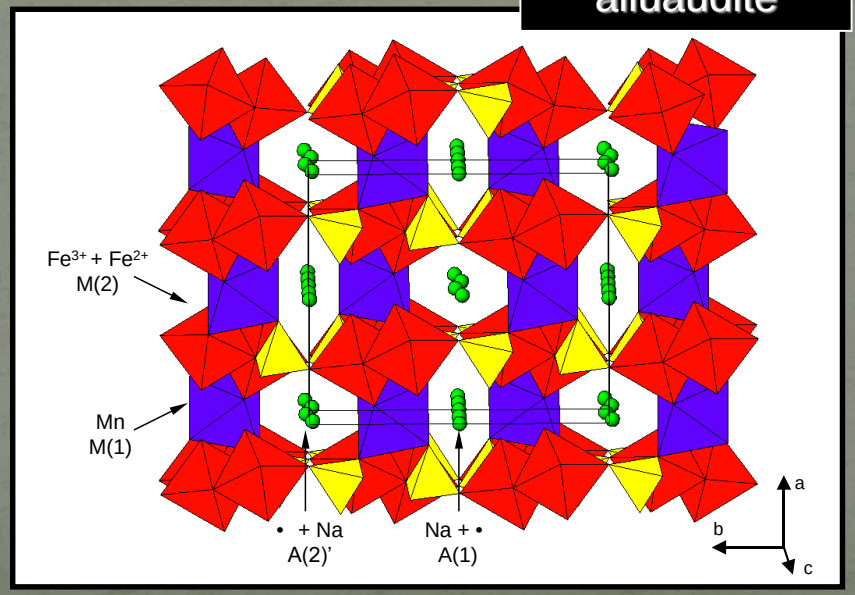
# Batteries Na-ion

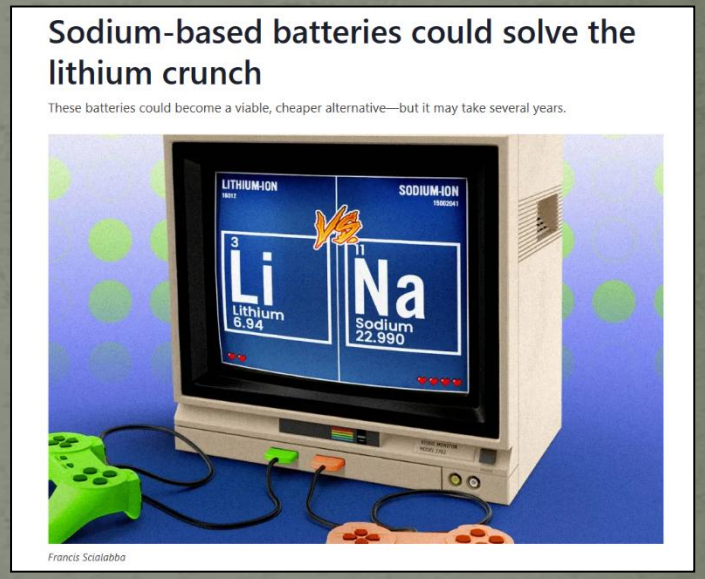
- Na beaucoup plus abondant que Li
- Batteries Na-ion se rechargent plus vite
- Meilleure longévité



Alluaudite, Buranga, Rwanda

Structure alluaudite

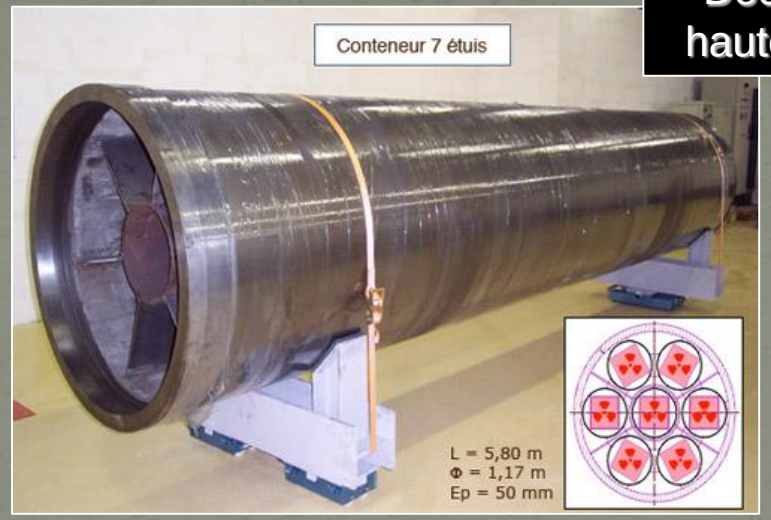


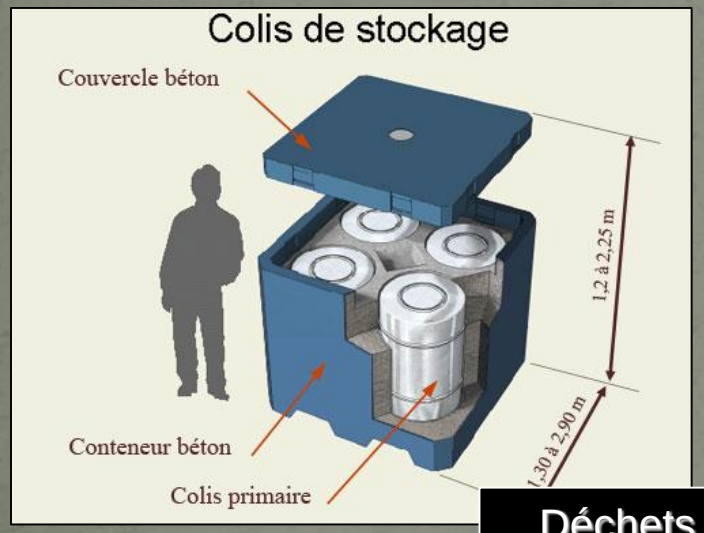
# Consommation énergétique

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

# Déchets nucléaires

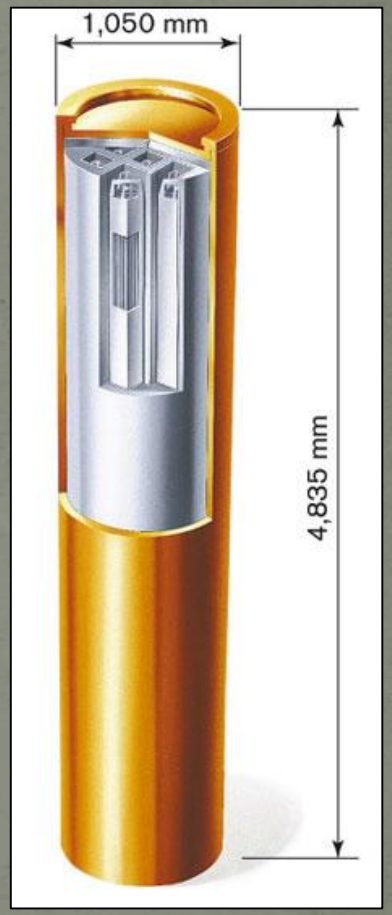



Déchets de haute activité




Déchets de moyenne activité

Enfouissement



# 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

France Inter Grille des programmes Podcasts Info Culture Humour Musique

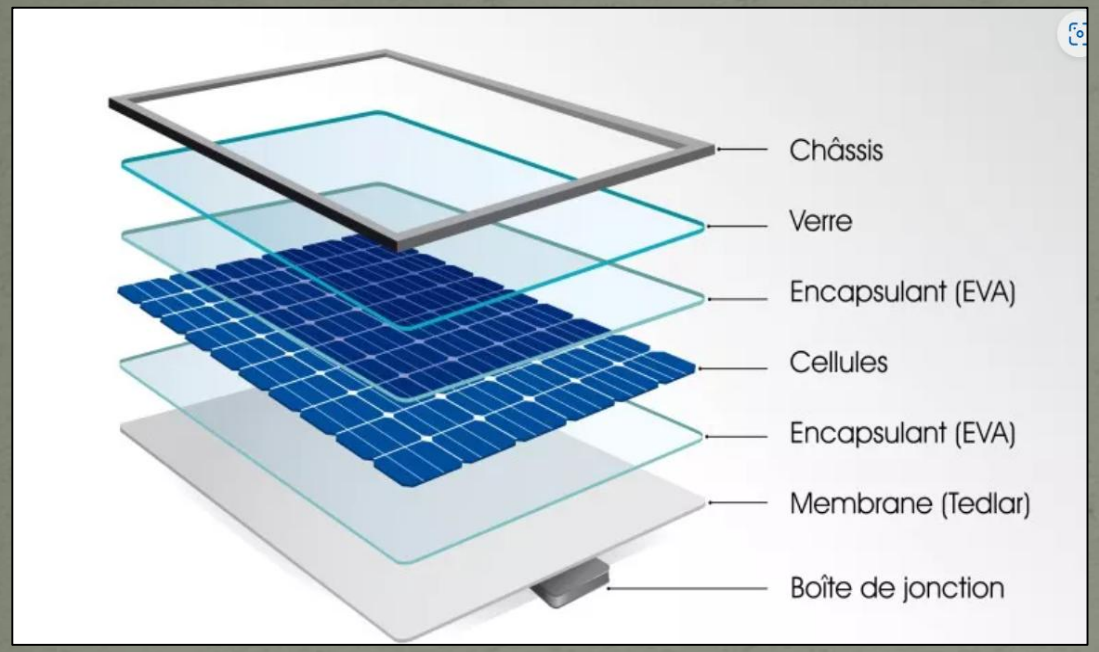
*« La mine de Bou-Azzer, créée en 1934 pendant la colonisation française, n'a cessé de s'agrandir et produit aujourd'hui plus de 2 400 tonnes de cobalt, métal essentiellement destiné aux batteries des véhicules, et près de 7 700 tonnes d'arsenic, une substance hautement toxique utilisée dans certains 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 minerai 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 echelle
- "Green washing"

# Solutions: recyclage?




**93 % recyclable ☺**

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

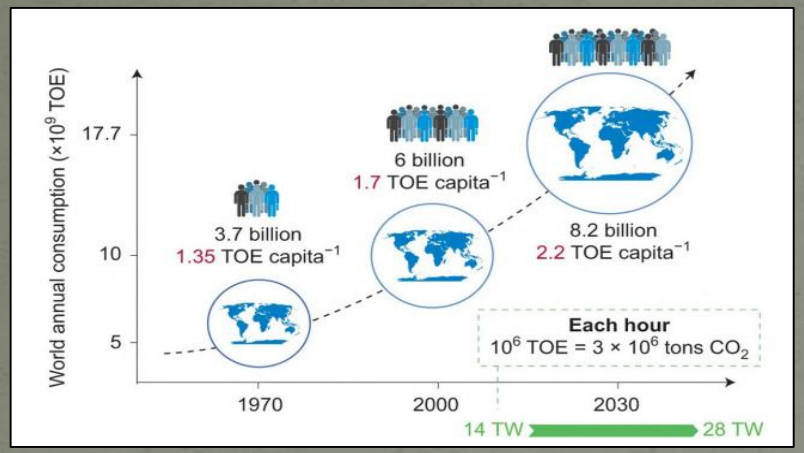
**7 % non-recyclable ☹**

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

Greenmat

« Recyclage » du silicium pour la fabrication d'électrodes pour batteries Li-ion

# La résilience!




## Règle des 4 “R”

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

## Rèduire 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.