



Le Nickel

François Beny, Candice Jaspard, Marianne Pochon, Quentin
Rousseau, Caroline Wiart

Propriétés physico-chimique du Nickel

- Sidérophile : associé au Fe dans les phases liquides (magmas)
- Métaux de transition :
 - Bons conducteurs électriques
 - Solides à température et pression atmosphérique
 - Masses volumiques élevées
 - Températures de fusion élevées
 - Catalyseurs
 - Entrent dans la composition des semi-conducteurs



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
8	Uue	Ubn	**															
			↓															
			*	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
				Ubu	Ubb	Ubt	Ubq	Ubp	Ubh	Ubs	Ubo	Ube	Utn	Utu	Utb	Utt	Utq	Utp
			**	Uth	Uts	Uto	Ute	Uqn	Uqu	Uqb								

Uue Éléments hypothétiques

Li Métaux alcalins

Be Métaux alcalino-terreux

Sc Métaux de transition

La Lanthanides (*)

Ac Actinides (**)

Ubu Superactinides (***)

Mt Nature chimique inconnue

Al Métaux pauvres

B Métalloïdes

Non-métaux :

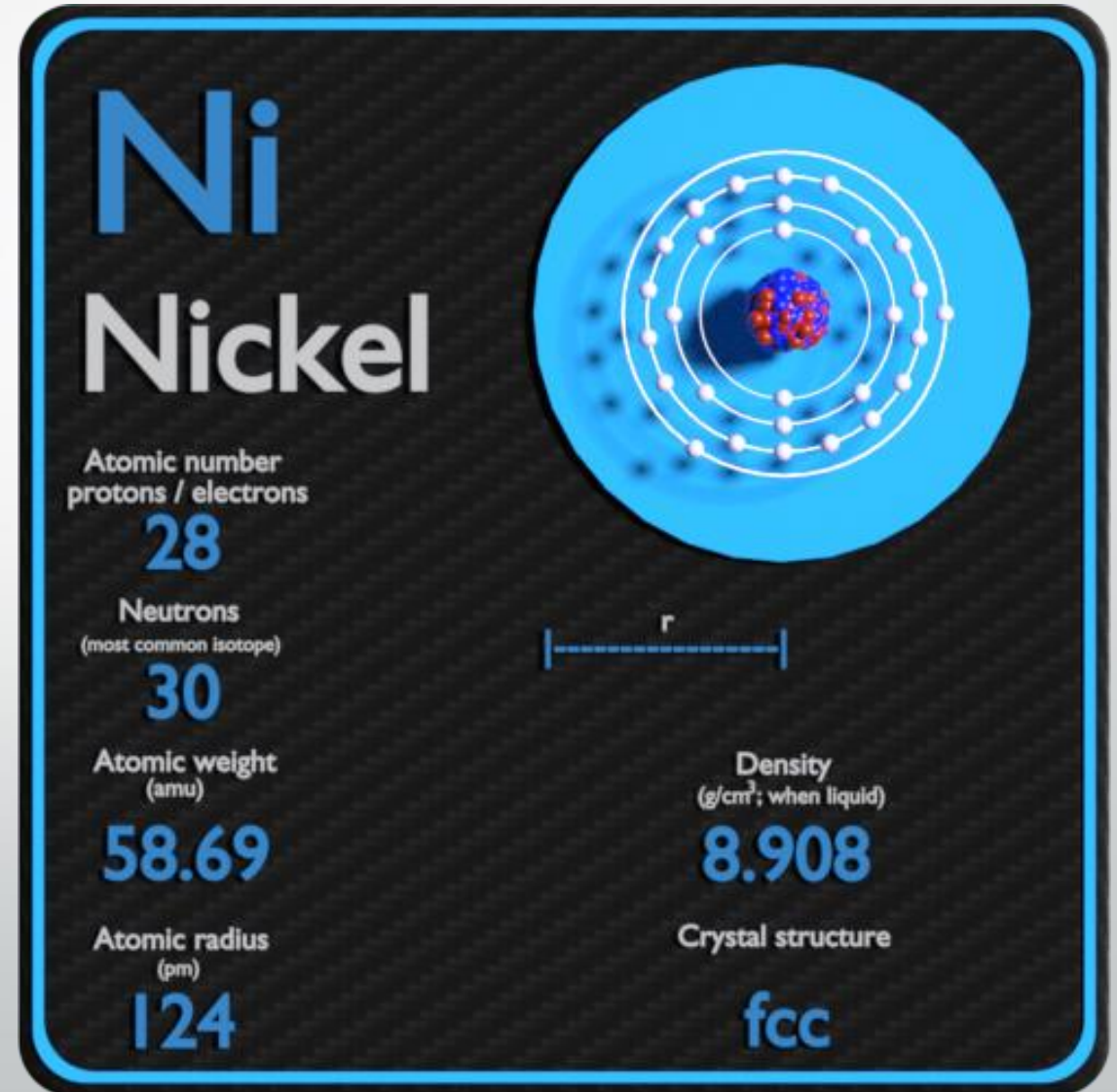
H « CHNOPS » et sélénium

F Halogènes

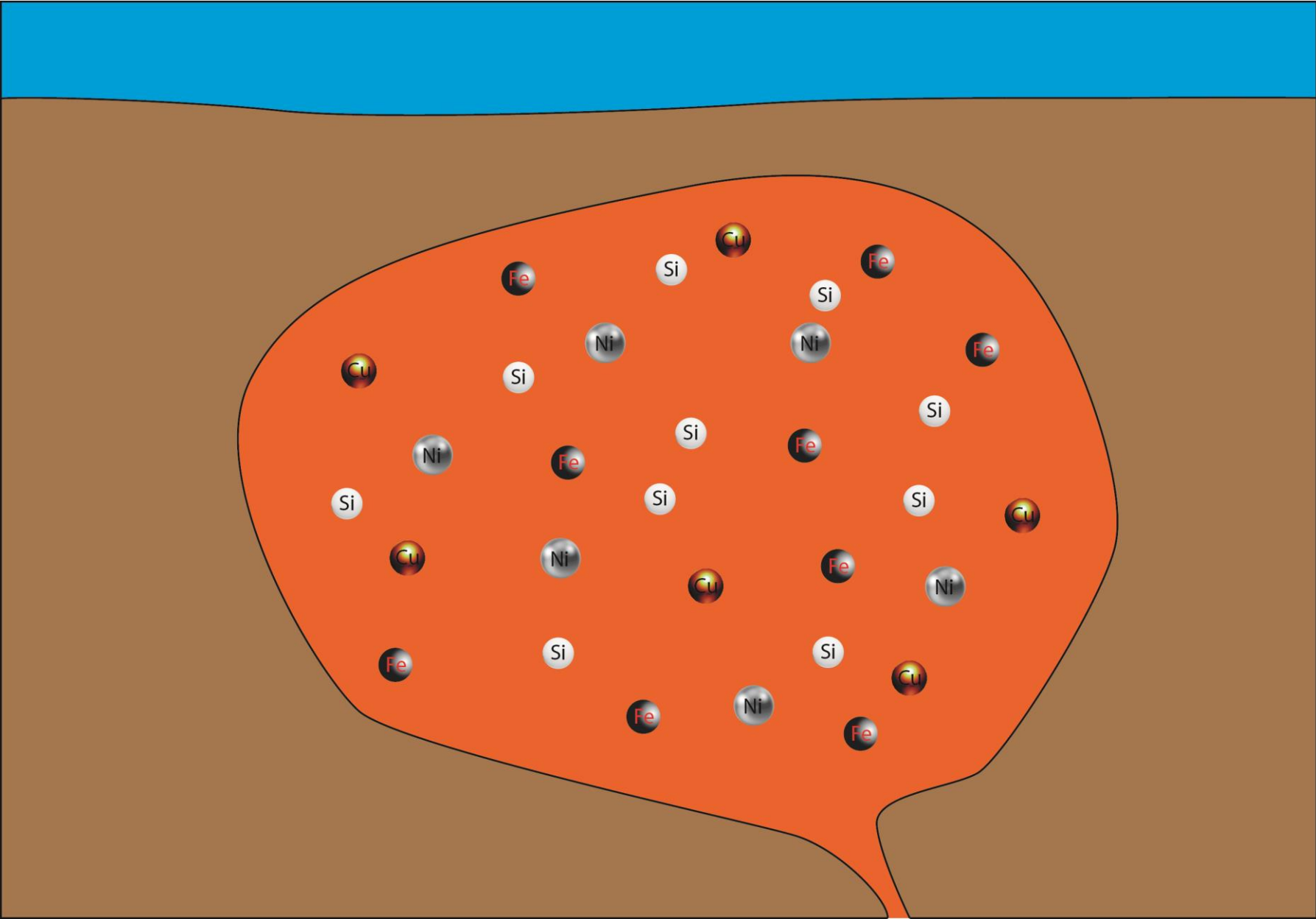
He Gaz nobles

Propriétés physico-chimique du Nickel

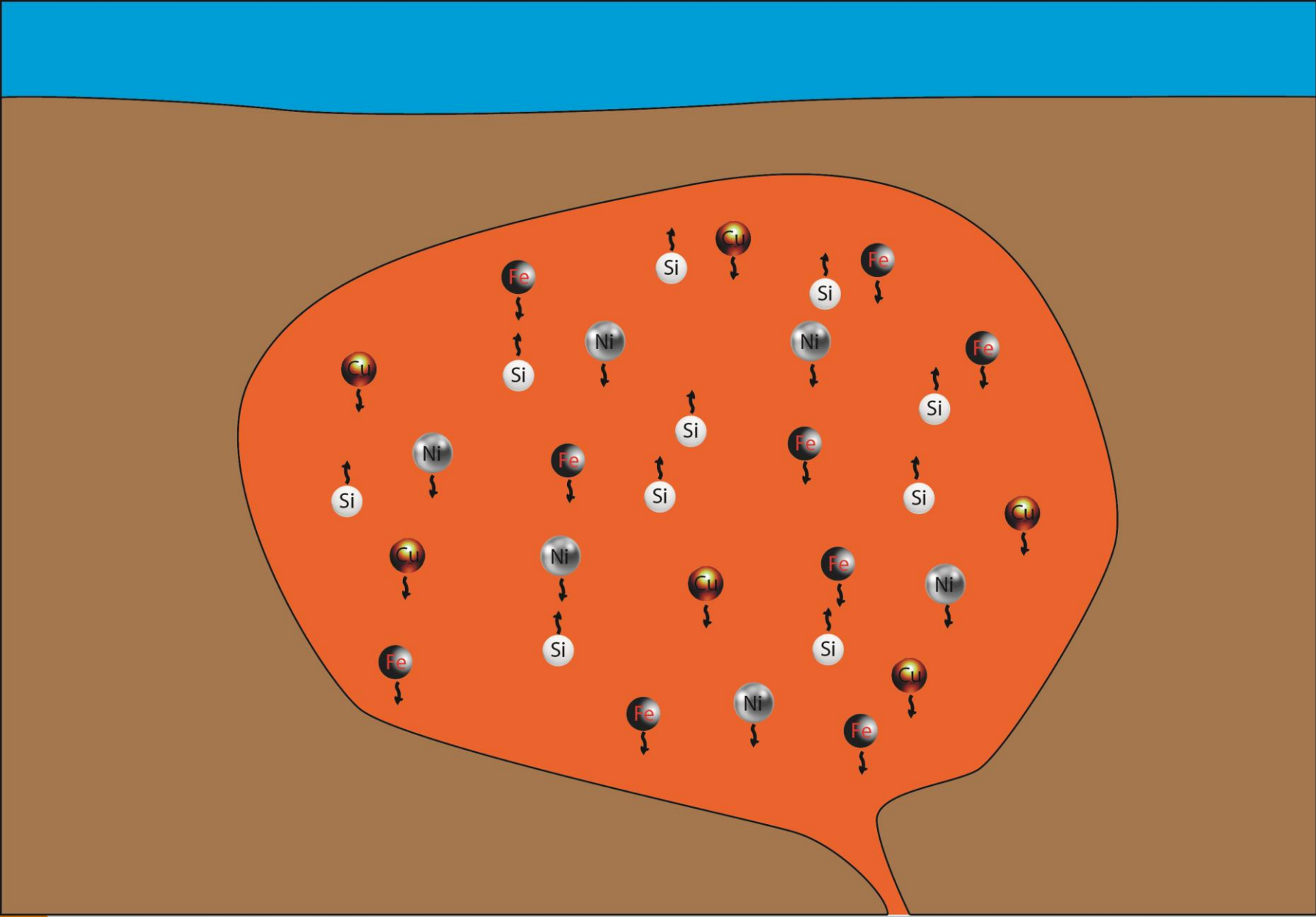
- Numéro atomique : 28
- Masse atomique : 58.69g/mol
- Dureté : 4 (échelle de Mohs)
- Densité : 8.907g/cm³
- Température de fusion : 1453°C
- Solubilité dans l'eau : insoluble
- Structure cristalline : face cubique centrée



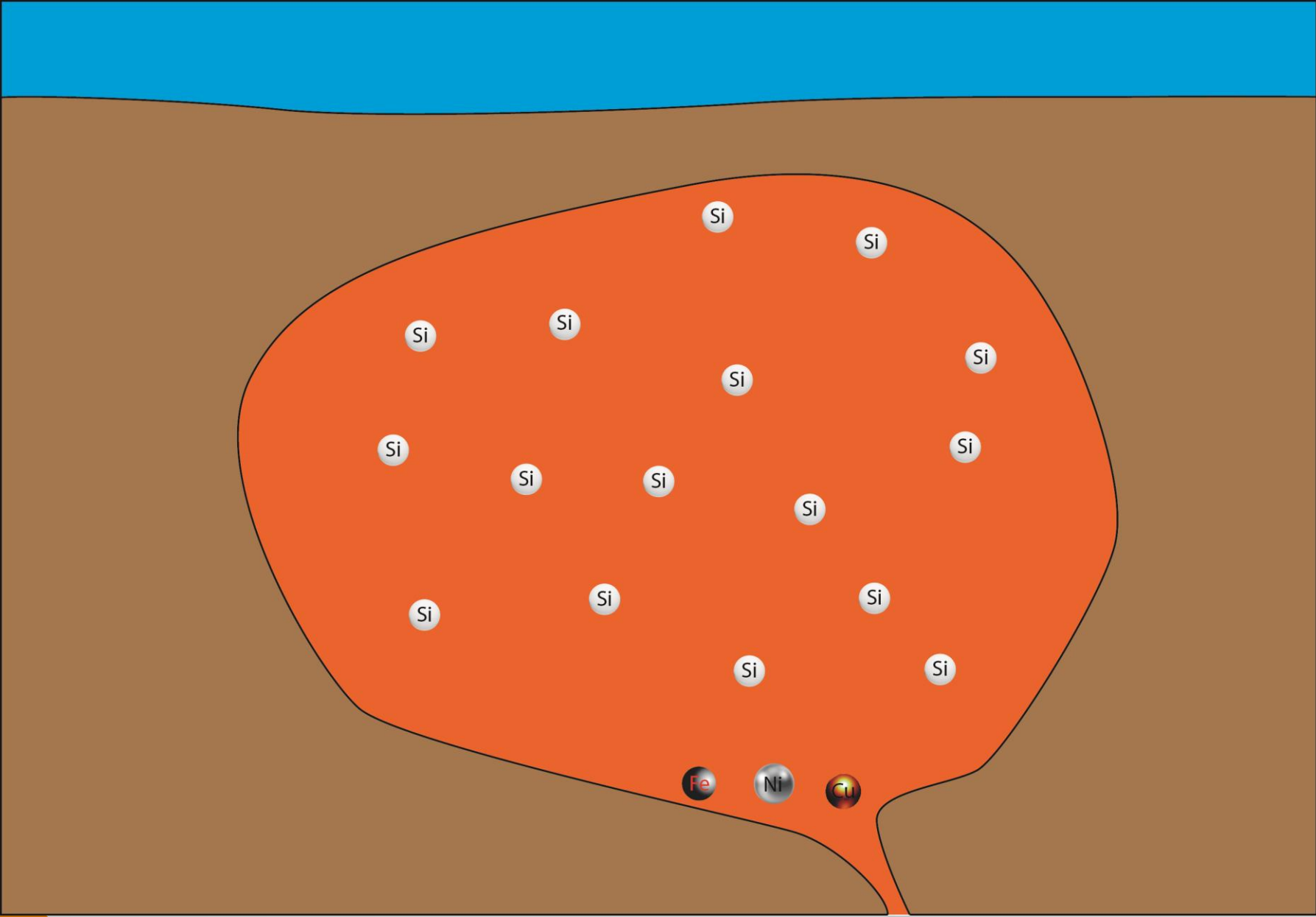
Gisements magmatiques



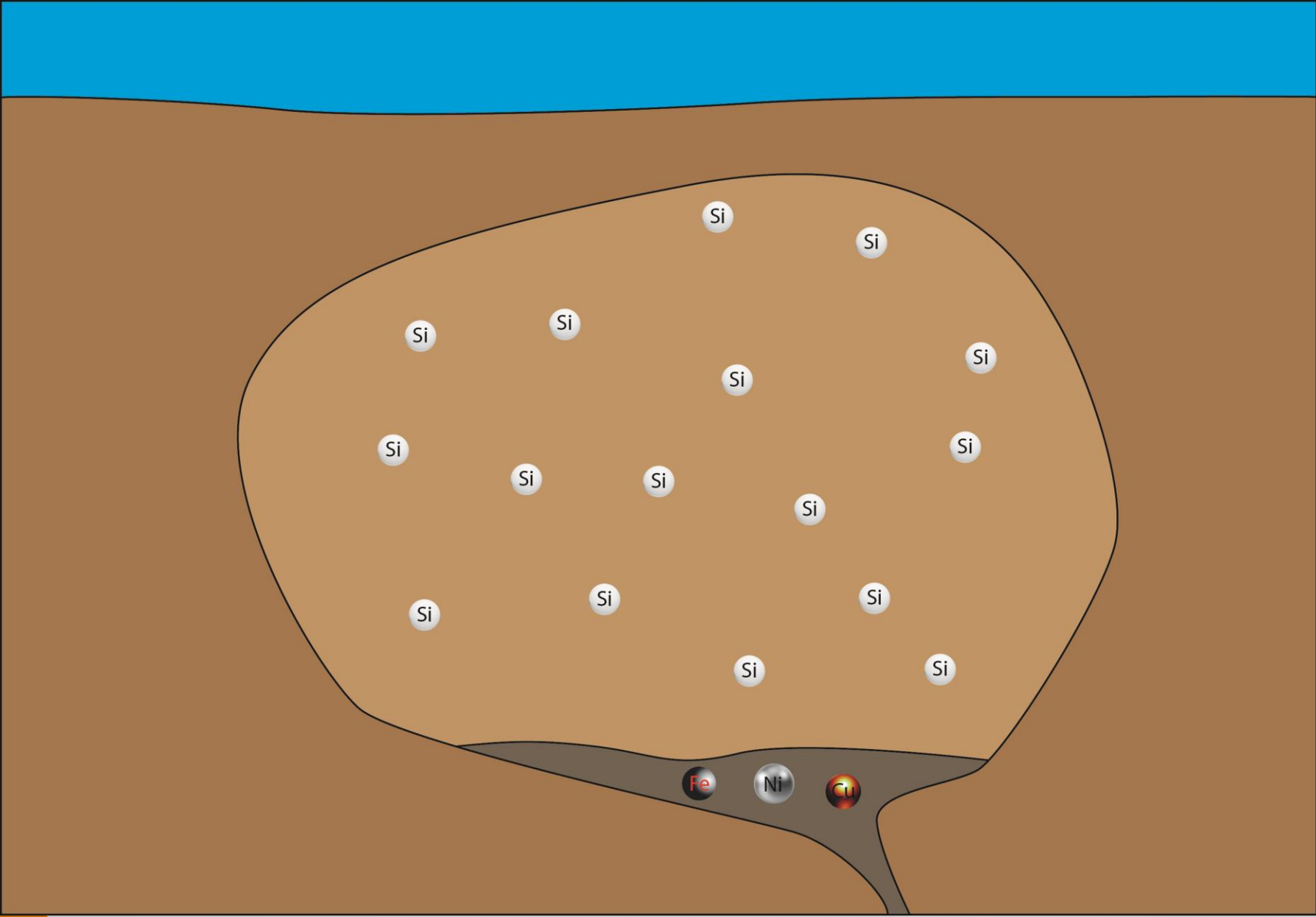
Gisements magmatiques



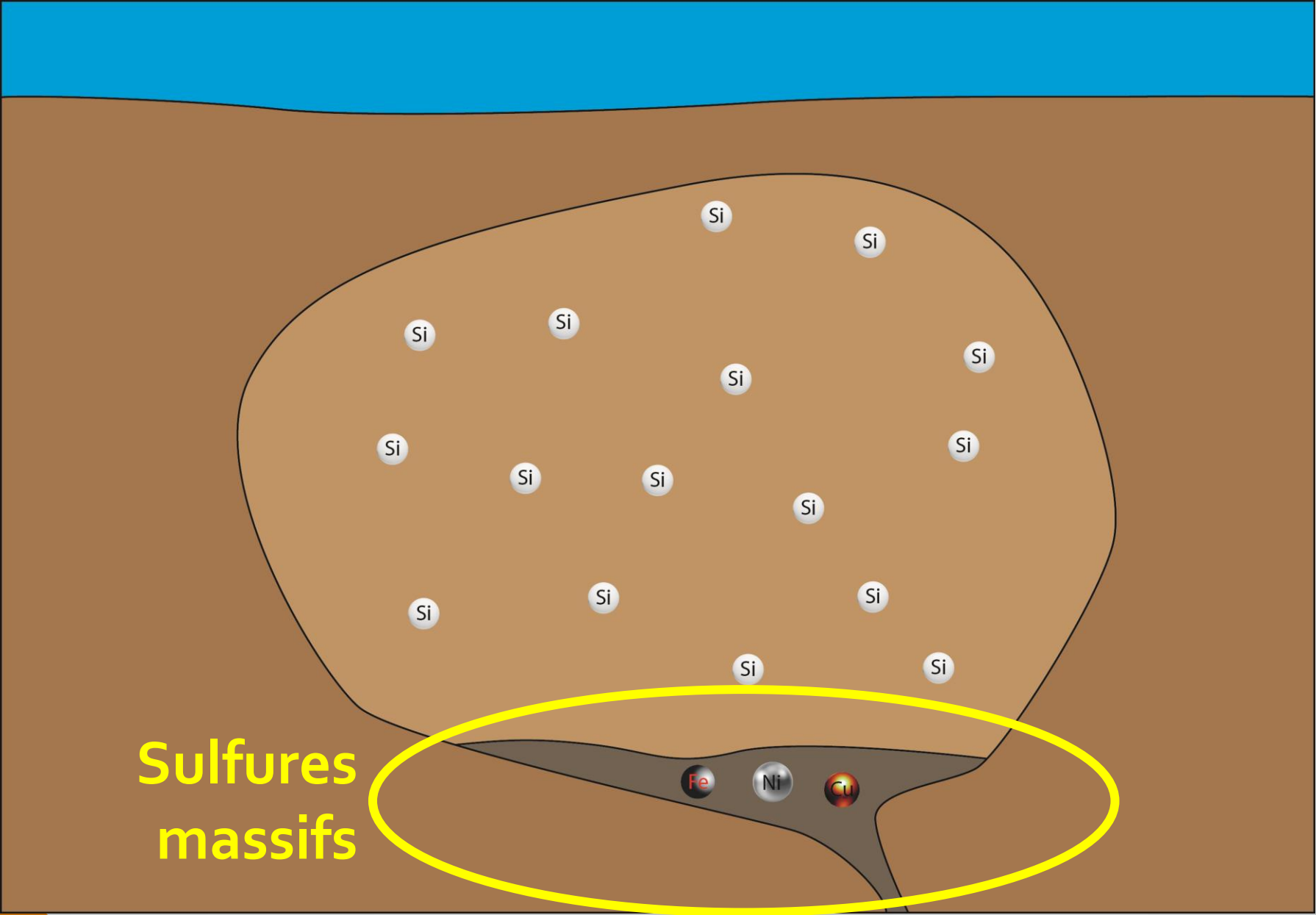
Gisements magmatiques



Gisements magmatiques



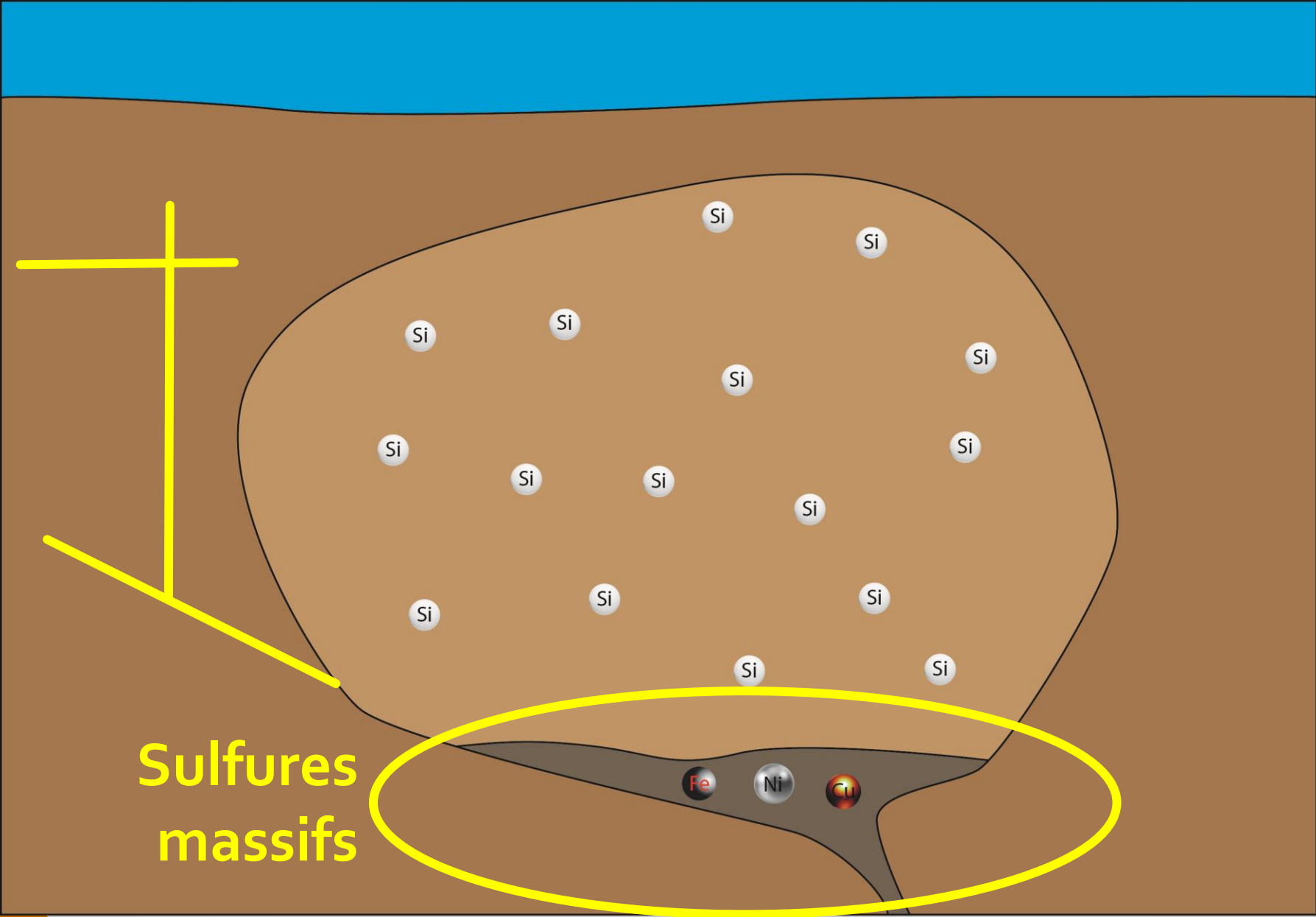
Gisements magmatiques



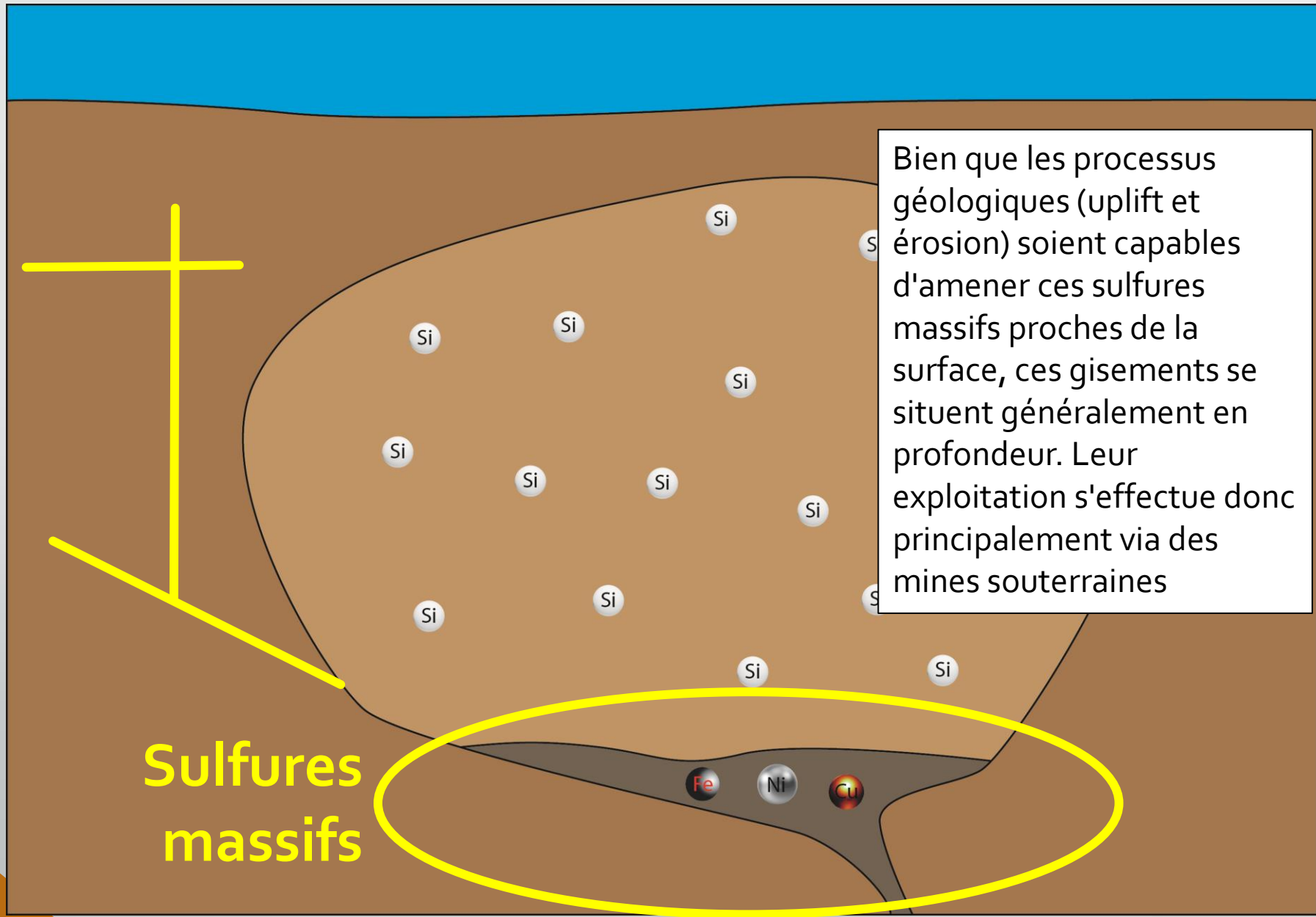
Sulfures massifs

Fe Ni Cu

Gisements magmatiques



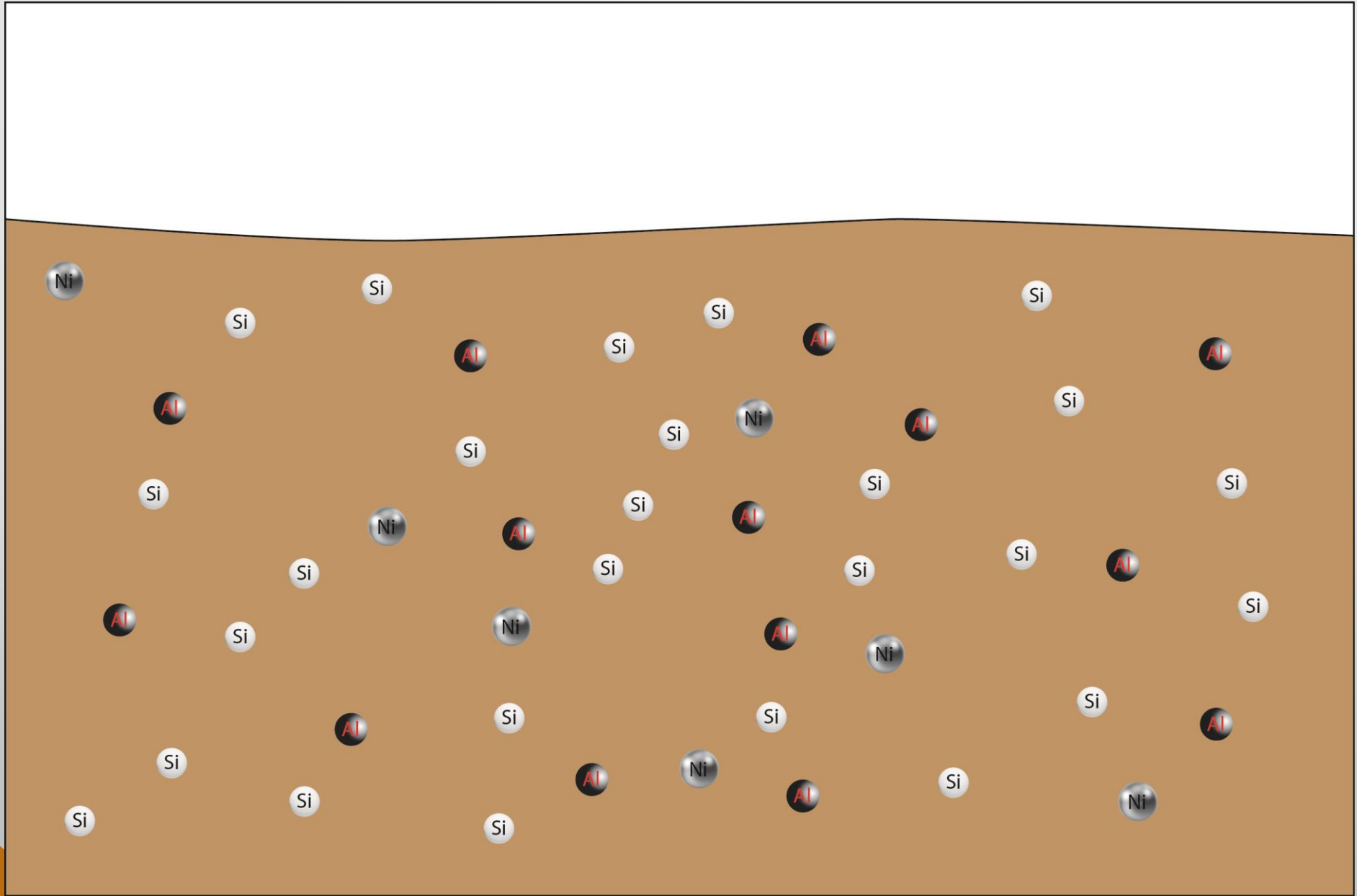
Gisements magmatiques



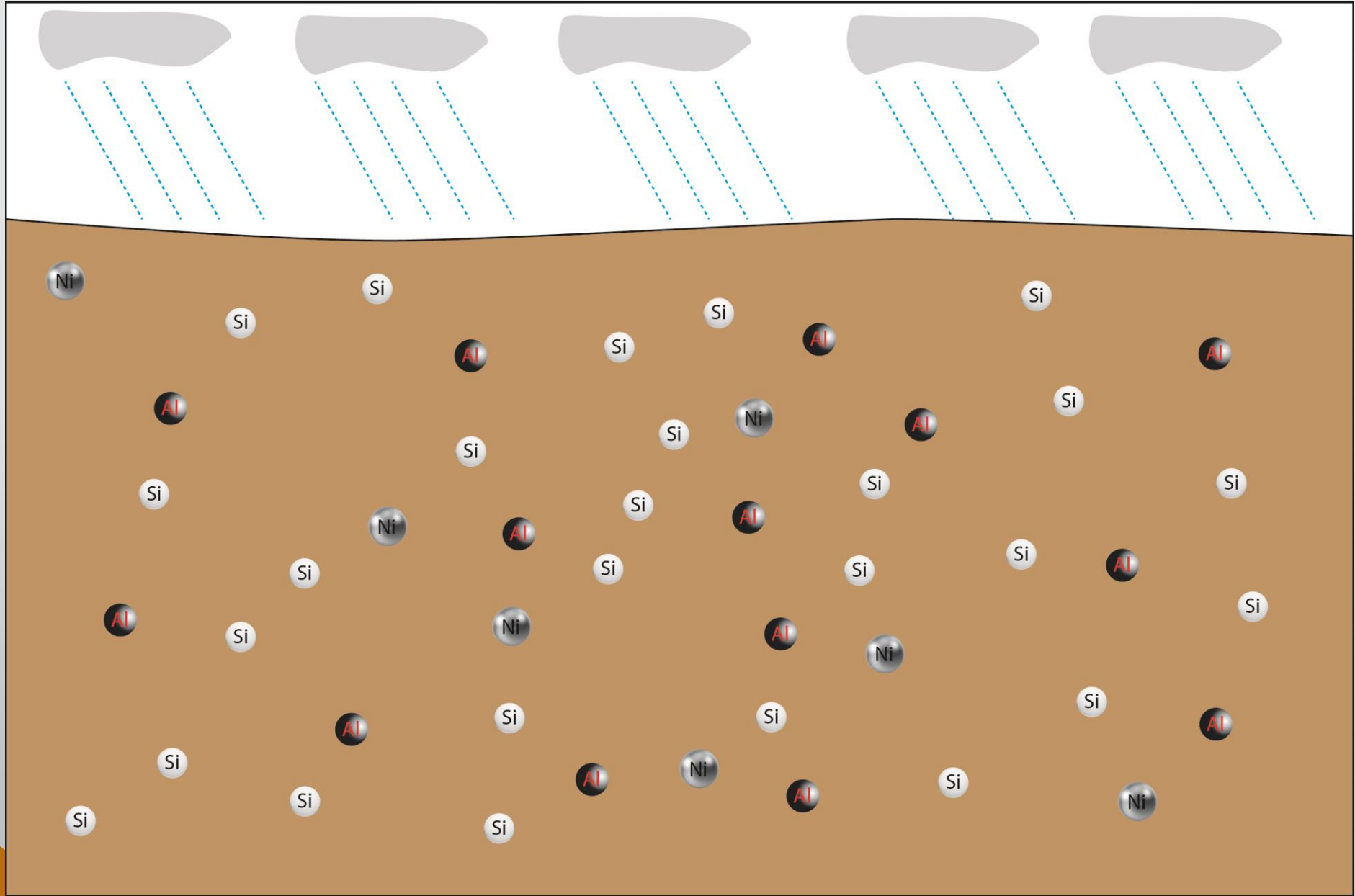
Bien que les processus géologiques (uplift et érosion) soient capables d'amener ces sulfures massifs proches de la surface, ces gisements se situent généralement en profondeur. Leur exploitation s'effectue donc principalement via des mines souterraines

Sulfures massifs

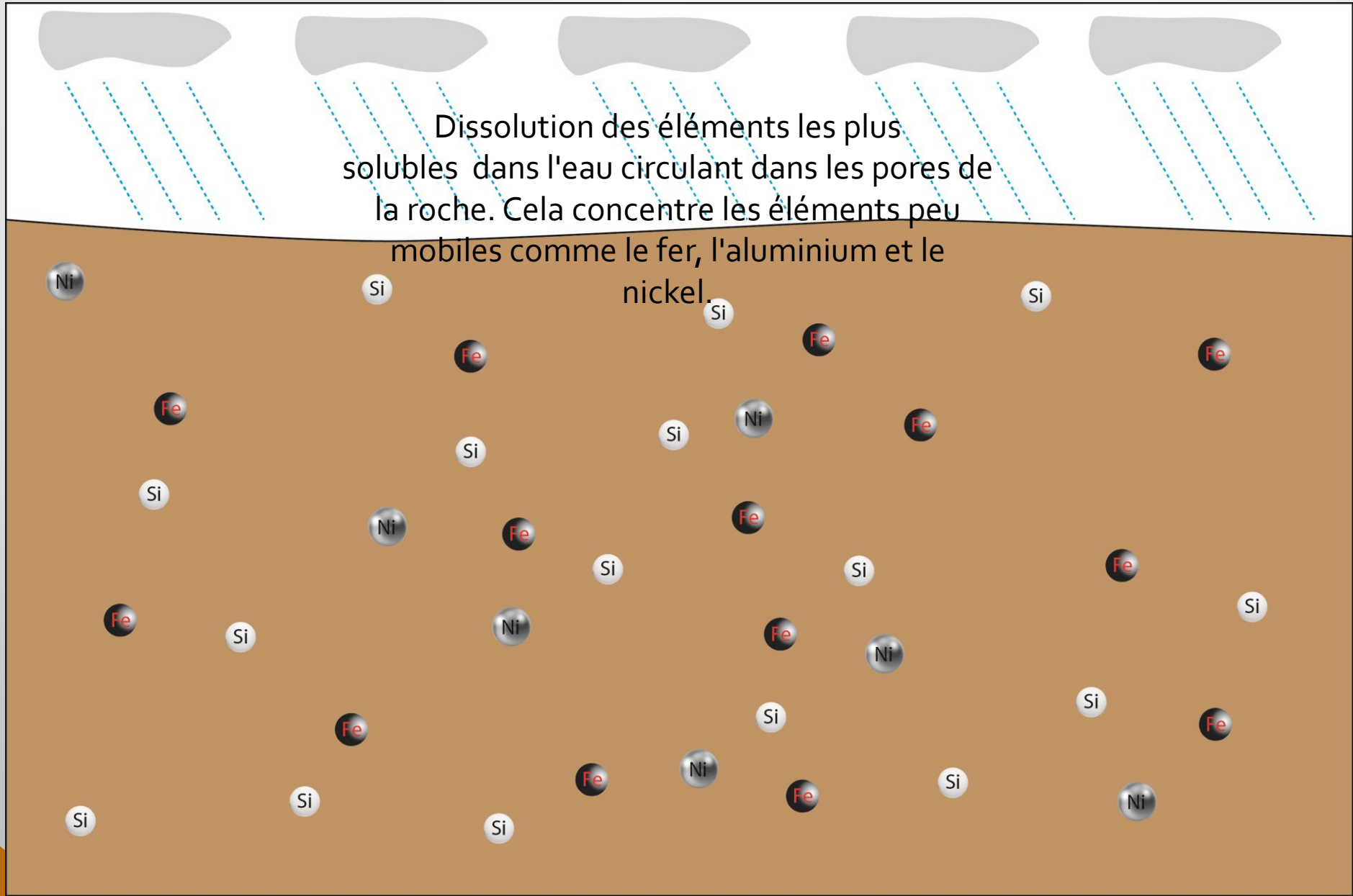
Gisements résiduels



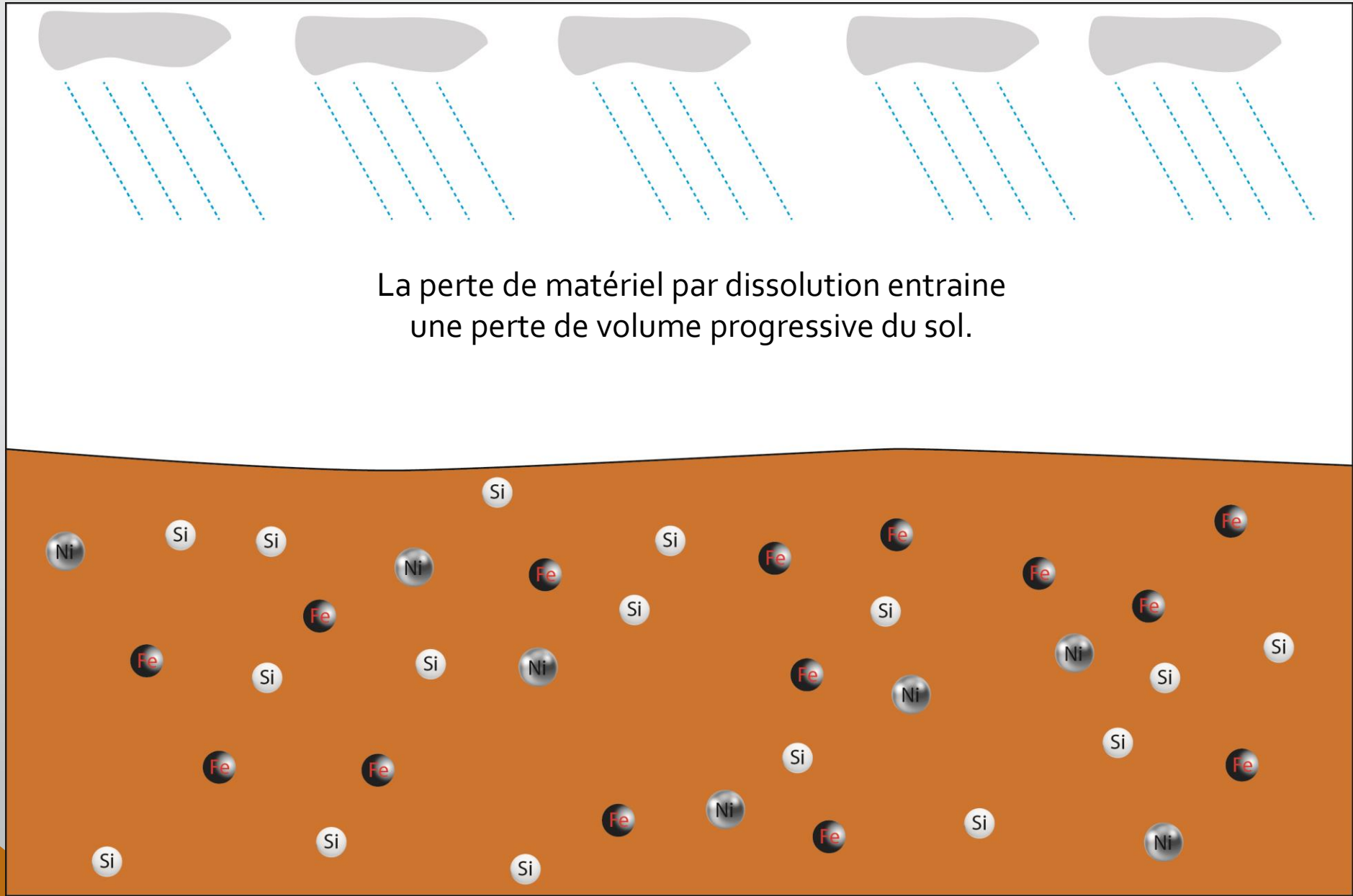
Gisements résiduels



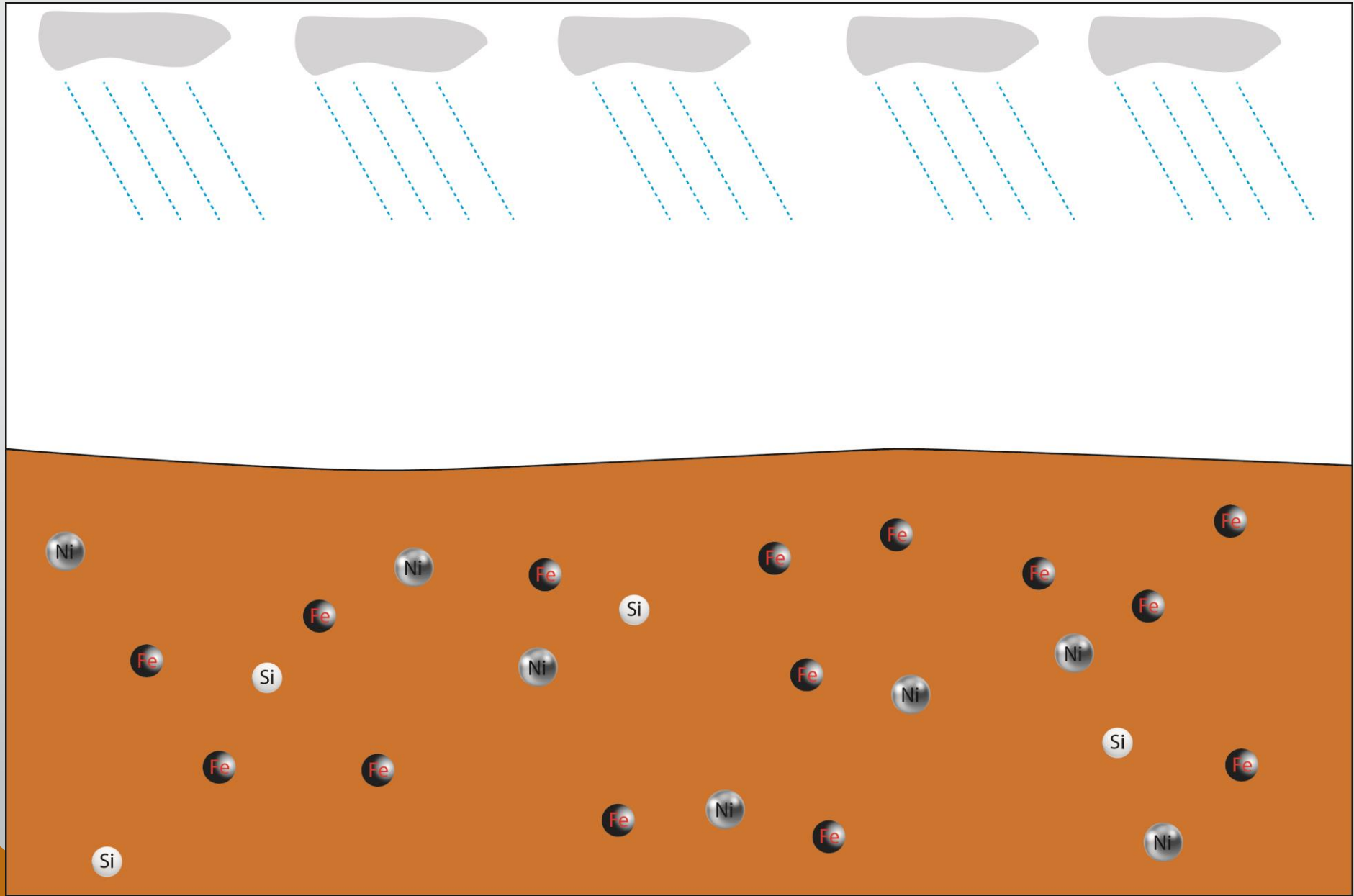
Gisements résiduels



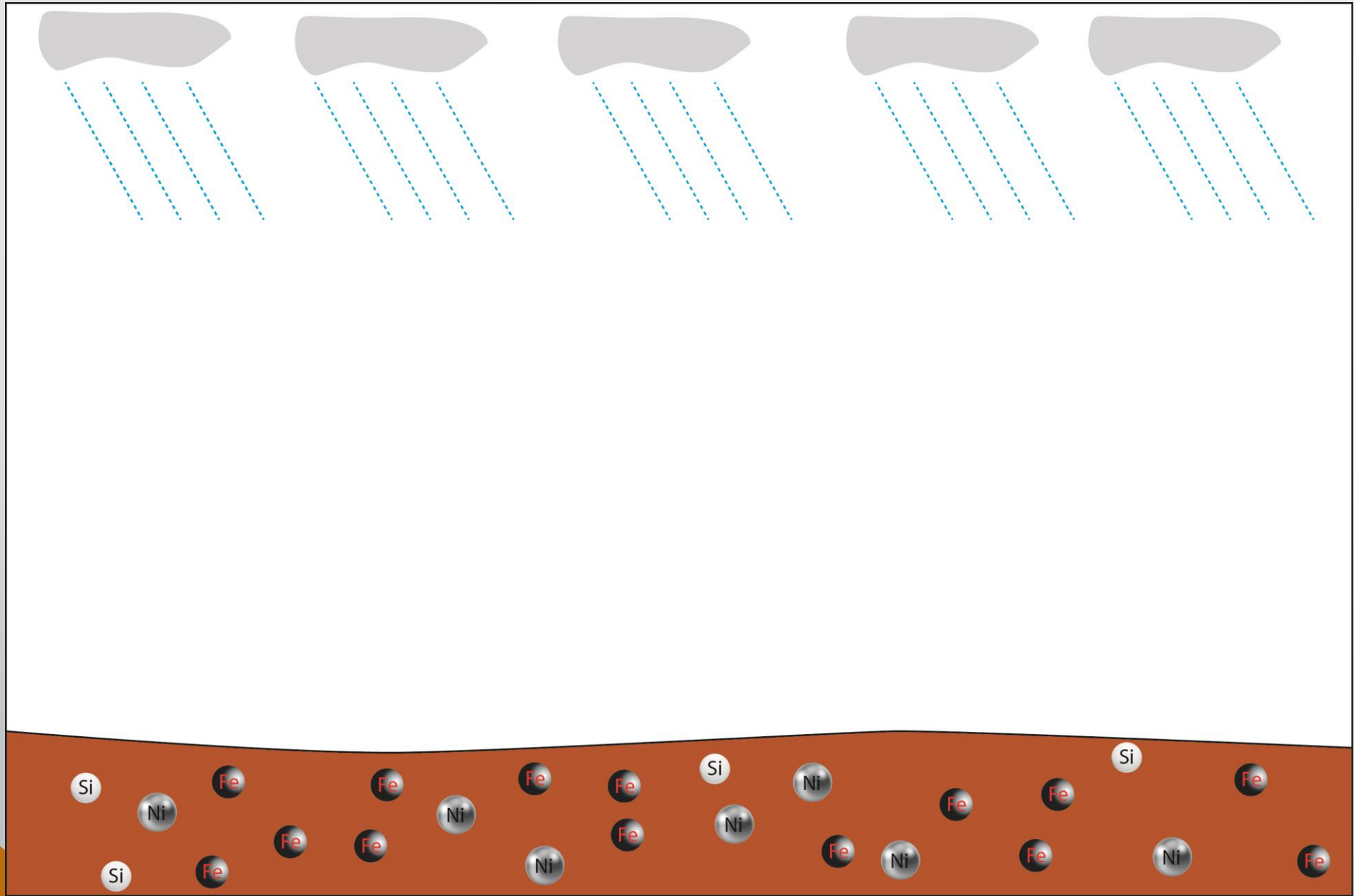
Gisements résiduels



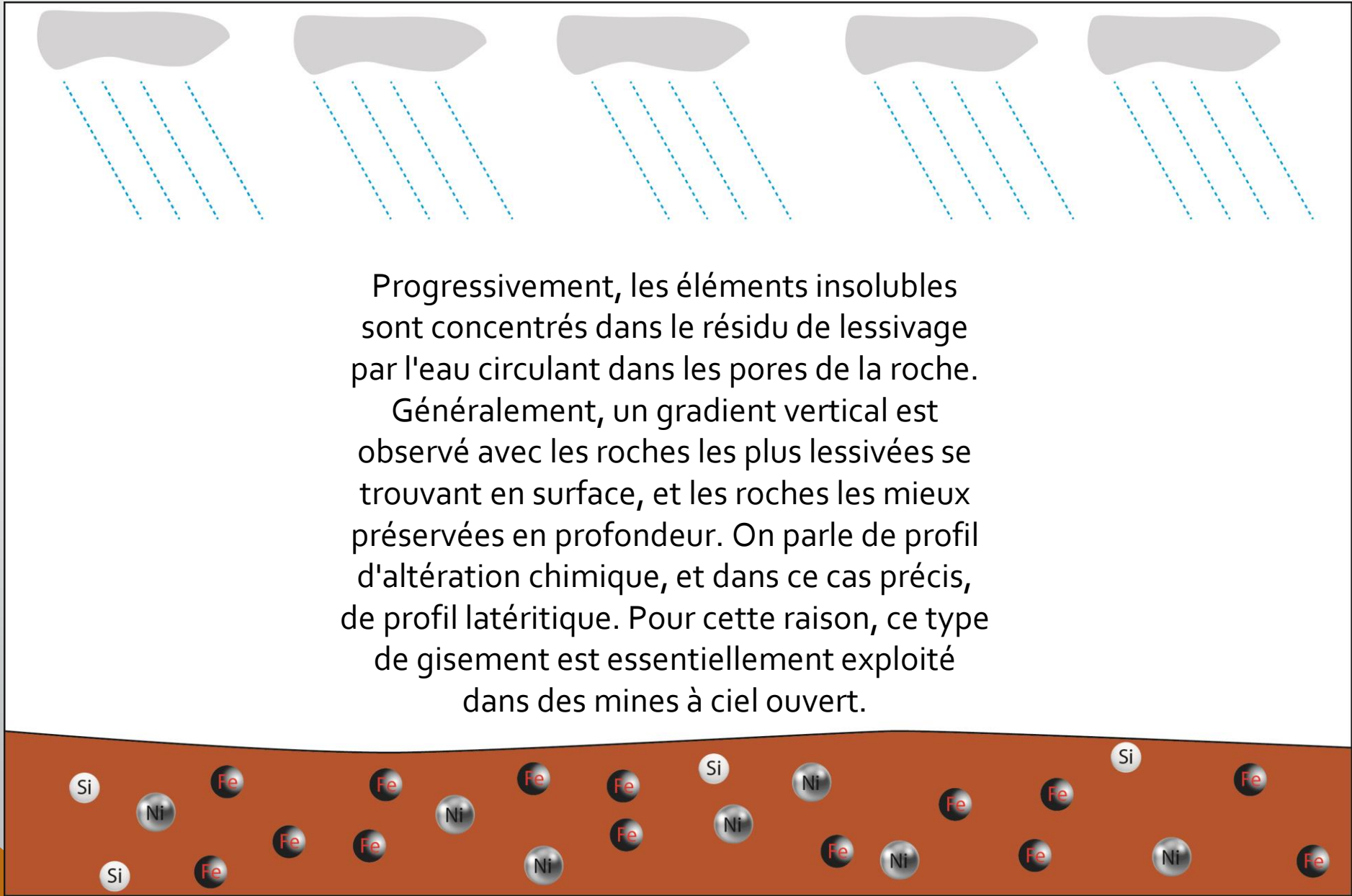
Gisements résiduels



Gisements résiduels



Gisements résiduels



Propriétés des gisements

Gisements magmatiques

- Taux de Ni : 0.7 à 4%
- Éléments associés : Co, Cu, Ag, Au, platinoïdes
- Principaux minéraux : sulfures



Pentlandite

Formule chimique : $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$

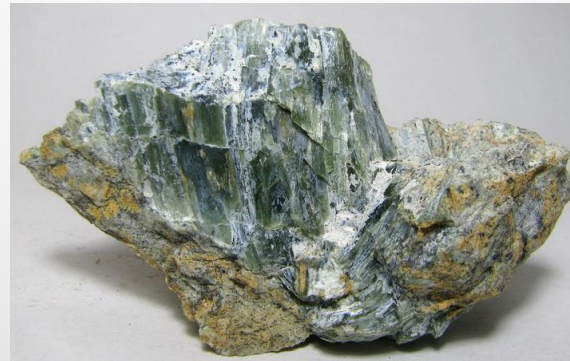
Densité : 4.8

Dureté : 3.5-4

Structure cristalline : cubique

Gisements résiduels

- Taux de Ni : 1 à 3%
- Éléments associés : Fe, Co, Cr
- Principaux minéraux : oxides ou silicates oxydés



Serpentine (antigorite sur la photo)

Formule chimique :

$(\text{Mg, Fe, Ni, Mn, Al, Zn})_3[\text{SiO}_5](\text{OH})_4$

Densité : 2.5-2.6

Dureté : 3.5-4

Structure cristalline : monoclinique



Goethite :

Formule chimique : $\text{FeO}(\text{OH})$

Densité : 3.3-4.3

Dureté : 5-5.5

Structure cristalline : orthorombique

Réserves mondiales de Ni en 2021 (en Mtons)



Production minière de Nickel (2021)

33 pays producteurs miniers
2,69 Mt de Ni contenu au global



en milliers de tonnes de Ni contenu

Indonésie	1 036	Canada	116
Philippines	392	Chine	104
Russie	196	Brésil	83
Nouvelle Calédonie	186	Guatemala	62
Australie	153	Cuba	47

Source : Eramet, INSG



En milliers de t de nickel contenu, en 2021, sur un total mondial de 2,69 millions de t. Source : Eramet et INSG

Commerce international du Nickel (2021)

Pays exportateurs → **Pays importateurs**

sur un **total de 54,5 millions de t** de minerais et concentrés *

en milliers de t de minerais et concentrés

Philippines	43 384	Guatemala	2 419
Nouvelle Calédonie	7 115	Côte d'Ivoire	303

Source : ITC

Les exportations des Philippines sont destinées à 97 % à la Chine

en milliers de t de minerais et concentrés

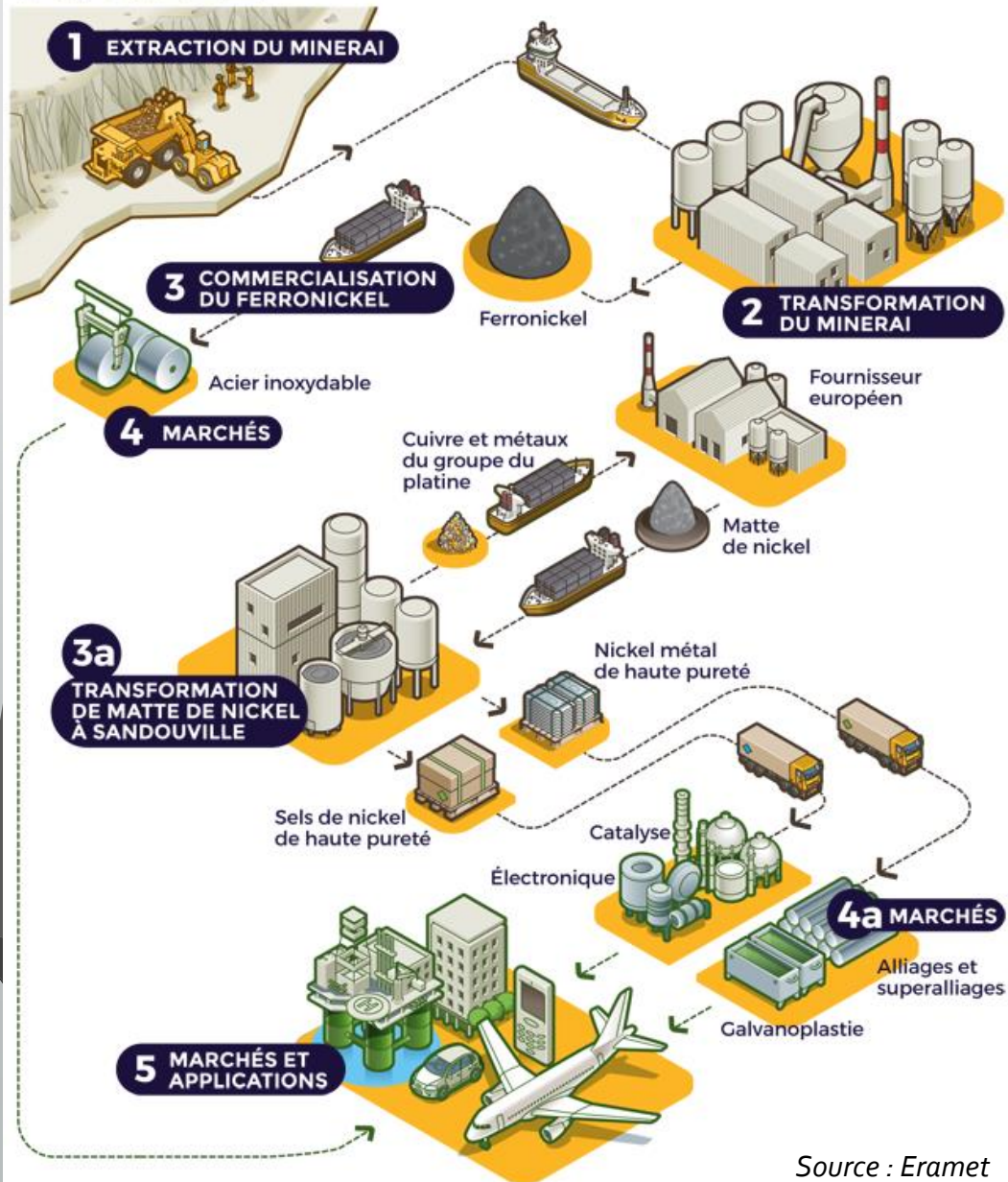
Chine	43 526	Ukraine	1 219
Corée du Sud	3 182	Chypre	272
Japon	3 092	République Dominicaine	74

Source : ITC

Les importations de la Chine proviennent à 90 % des Philippines, 5 % de Nouvelle Calédonie, 2 % d'Indonésie.

*Les minerais oxydés sont exportés sous forme de minerais bruts, tandis que les minerais sulfurés subissent un traitement physique afin d'obtenir des concentrés

NICKEL



Cycle de transformation du minéral de Nickel

Exemple du minéral oxydé latéritique

PRODUITS

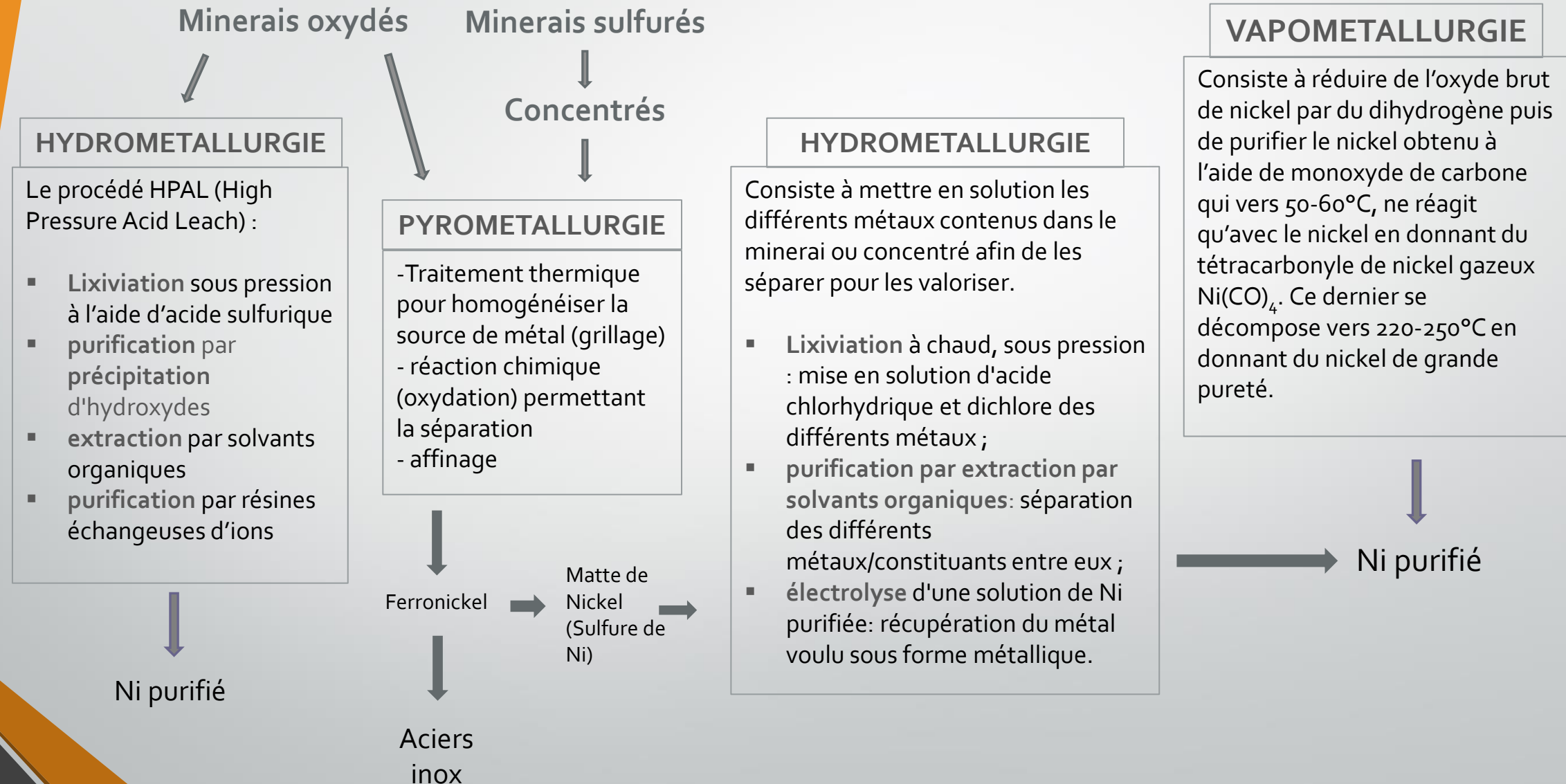
Nickel de classe I (Pureté > 99,8%)

= sous forme de cathodes ou « carrés » de nickel, de poudre de nickel, de sulfate, d'oxyde ou d'hydroxyde
46% de la production primaire de Ni en 2019

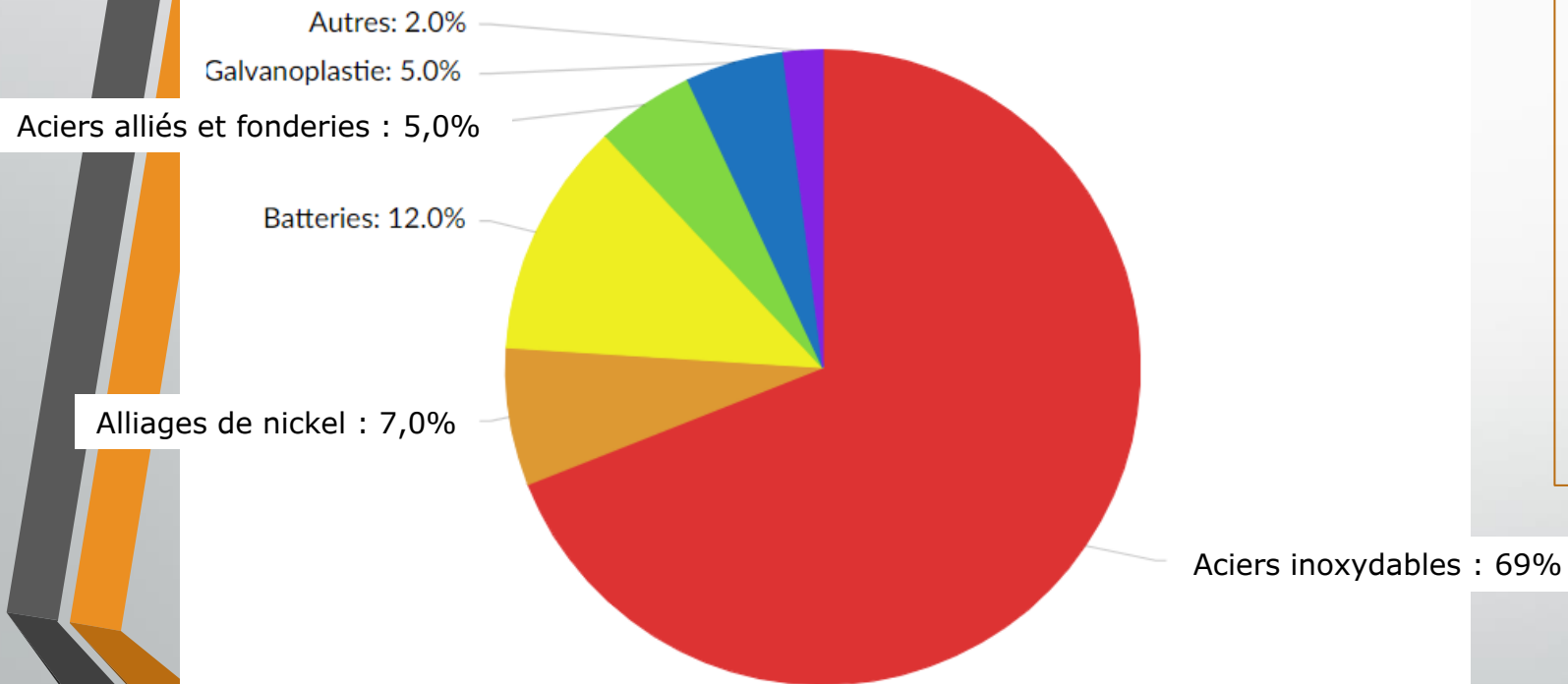
Nickel de classe II (Pureté < 99,8%)

= sous forme de ferronickel classique à 25 % de Ni et Nickel Pig Iron (NPI), ferronickel renfermant environ 10 % de Ni

Zoom sur les Procédés d'extraction du Ni



Utilisations du Nickel



En 2021, dans le monde. Source : Eramet

Le Nickel comme métal

- Batteries
- Equipements d'industrie chimique
- Nickelage (protection contre la corrosion)

Le Nickel dans les alliages

- rend l'acier + résistant à la corrosion et augmente sa dureté
- Constantan (55% de Cu, 45% de Ni)
- Superalliages (turbines d'avions)
- Le nickel-argent (coutellerie, appareils électrotechniques)

Le Nickel et la transition énergétique

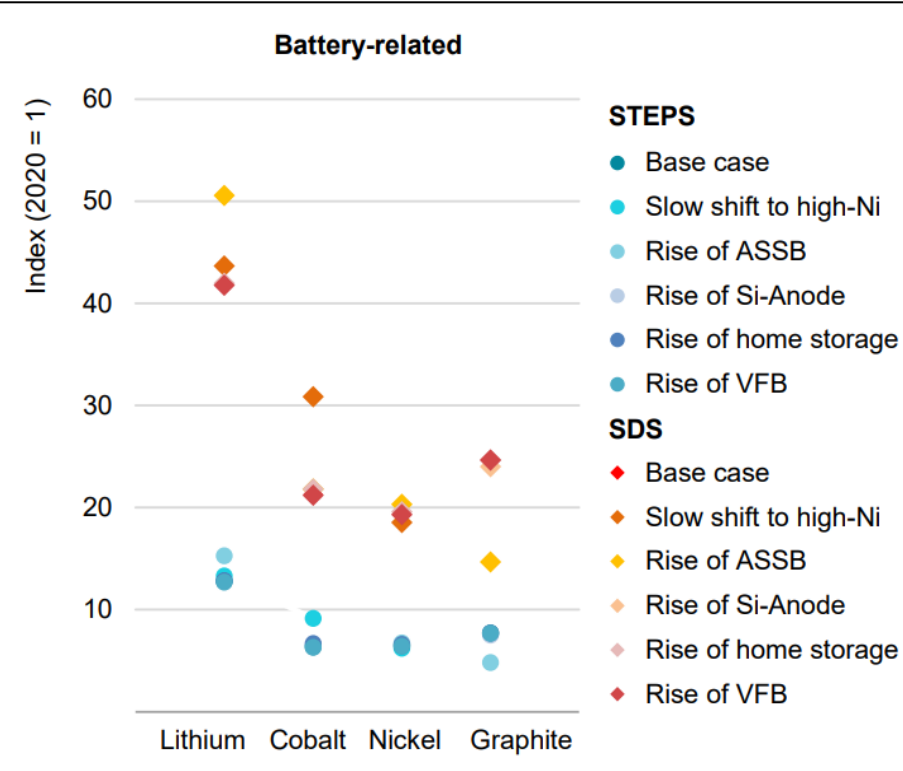
Nickel needs for clean energy technologies

Solar PV	●
Wind	●
Hydro	●
CSP	●
Bioenergy	●
Geothermal	●
Nuclear	●
Electricity networks	●
EVs and battery storage	●
Hydrogen	●

Relative importance of Nickel for a particular clean energy technology

High: ● Moderate: ● Low: ●

Mineral demand from clean energy technologies in 2040 relative to 2020 under different scenarios and technology evolution trends



STEPS : Stated Policies Scenario

SDS : Sustainable Development Scenario

Un élément essentiel

- Dans les batteries
- Pour l'hydrogène
- Pour la géothermie

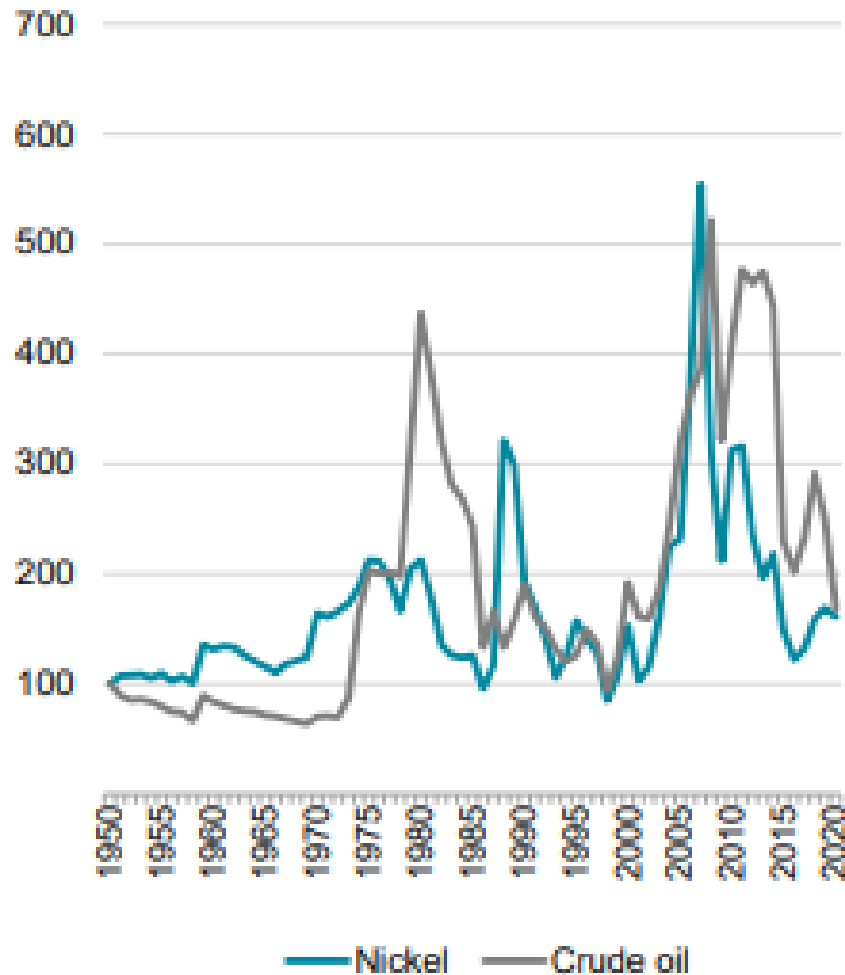
Une demande qui va se multiplier d'ici 2040

Pour le secteur de l'énergie :

- par 6 selon les trajectoires actuelles
- par 20 selon les scénarios compatibles avec les accords de Paris

Par 4 de manière globale dans un scénario 2°C

US price trends for Nickel in real terms, 1950-2020



Forte volatilité du prix

- freine les investissements

Long délai entre découverte d'un gisement et production

- **13 ans** pour les sulfides

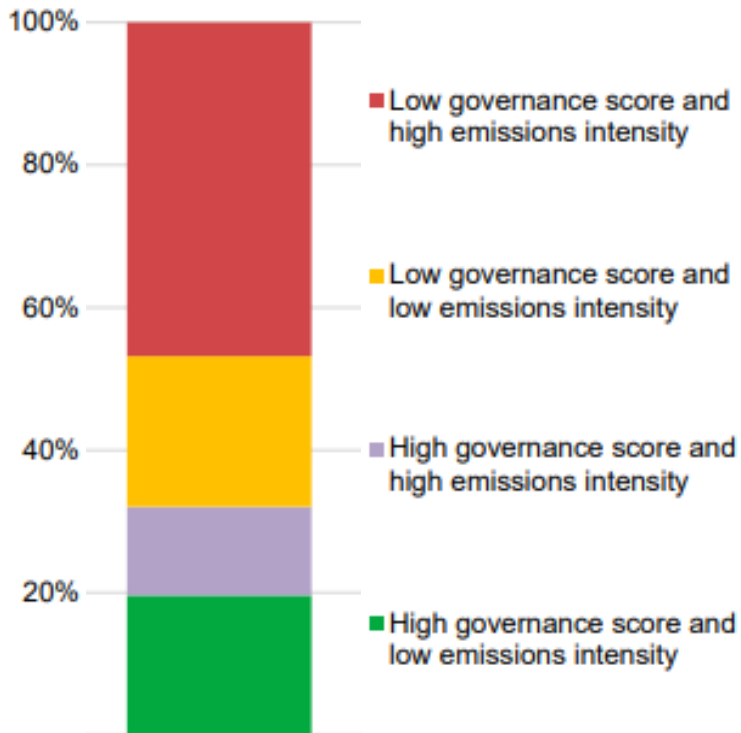
- **19 ans** pour les latérites

Défaut d'approvisionnement possible à horizon 10 ans selon l'IFPEN

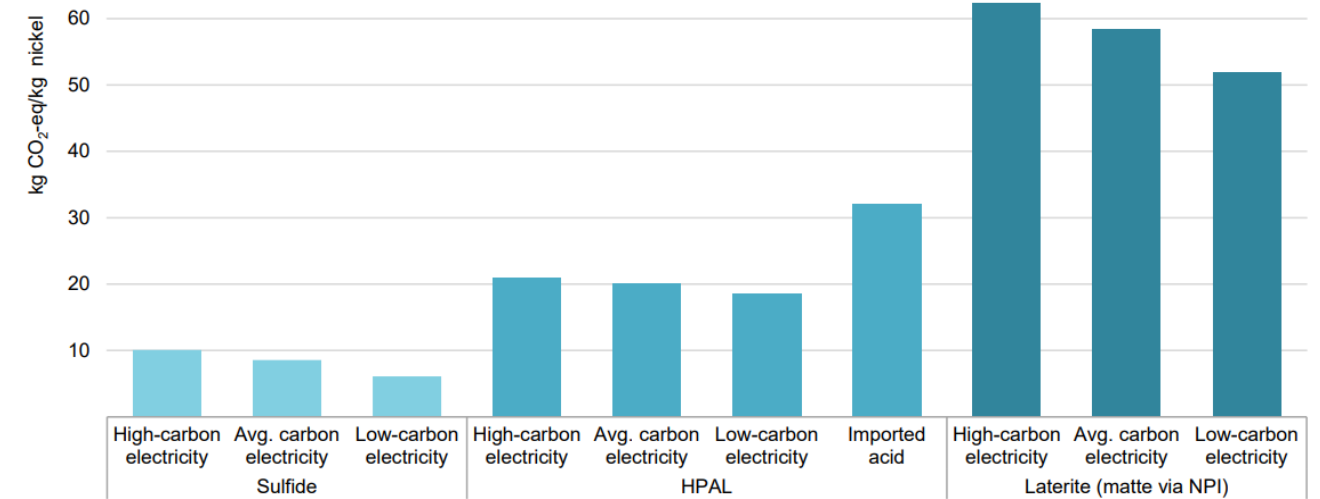
Prix du Nickel au 12/12/2022 : 30 000\$/t

De nouvelles exigences sur la filière : émissions et gouvernance

Distribution of production of Nickel by governance and emissions performance, 2019



GHG emissions intensity for an indicative nickel production project under different grid scenarios and production pathways



Régulation Européenne

la proposition prévoit un niveau minimum de 4% de Nickel recyclé dans les batteries à partir de 2030, et 90% récupéré d'ici 2026, chiffres qui devront ensuite augmenter

Géopolitique du Nickel

L'Indonésie : le pays du nouvel or noir fait l'objet de nombreuses convoitises

- 1/4 réserves mondiales ; 21 Mtons
- Latérite -> procédé métallurgique -> sulfates batteries
- Parc Industriel Indonésien Morowali (IMIP) = 66 000 Indonésiens dans 42 entreprises (maj. Chinoise) ; "Max 10% employés chinois" ; supervision chinoise

Une histoire ancienne avec la Chine...

1er producteur de voiture électrique & acier inox

- Diaspora chinoise d'Indonésie pour travailler dans les mines (charbon, pétrole, métaux)
- Naissance de l'IMIP par accord avec Xi Jinping en 2013 – Maillon des nouvelles routes de la soie
- **Tsingshan** : procédés low cost de production de fonte brute de nickel, 20% du marché global

Qui se heurte à la volonté de développer une voie nationaliste :

- 2010 : Vente de 20 à 51% des parts des compagnies étrangères à des parties selon année d'exploitation
- 2014 : embargo sur les exportations (Chine & USA : Freeport)
- La naissance d'une animosité envers les Chinois



Où l'on trouverait l'intégralité de la filière des voitures électriques

avec Tesla : promesse d'achat sur cinq ans, pour 5 milliards de dollars, de précurseurs pour batterie, auprès de deux fournisseurs chinois implantés à Morowali.

Le groupe a fait l'objet de nombreuses critiques de la part des ONG environnementales

Géopolitique du Nickel

Zoom sur la Nouvelle Calédonie : Le Gisement de Goro

- 1/4 ressources mondiales
- 7% PIB 2018
- 1/5 emplois
- 90% exportations (sous forme de FeNi ; Matte ; NHC – Nickel/Cobalt)
- Saprolites > Latérites

Procédé innovant de lixiviation qui n'a pas atteint ses objectifs (Vale , Brésil) -> Vente mais désaccord sur la succession

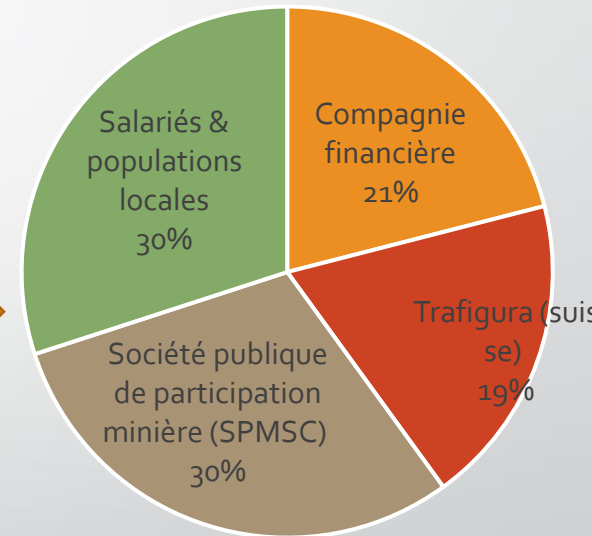
Loyalistes : gestion libérale par actionnaires privés

Opposants
indépendantistes
: socialisme
industriel



Forte demande
par la Chine

Accord trouvé



4 mars 2021

+ **Tesla** : Partenariat industriel de haut niveau avec les dirigeants calédoniens
"Le nickel est notre principale préoccupation" pour le développement
des batteries lithium-ion

Elon Musk, tweet du 25/02/2022

Recyclage

Nickel recyclable de nombreuses fois avec un grand maintien de la qualité

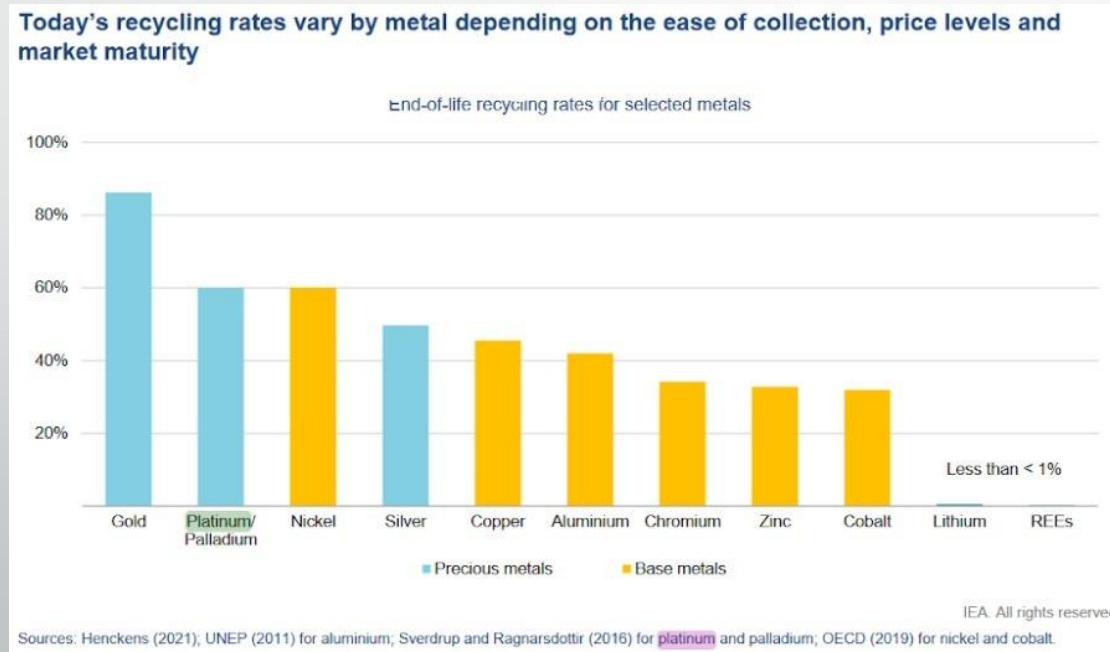
Le recyclage fournit 50 % du Ni destiné à la production des aciers inoxydables (Ni contenu dans les aciers inoxydables est réutilisé lors du recyclage de ces aciers) et 20 % des autres utilisations.

Aux États-Unis, en 2020, recyclage de 100 000 t qui représentent 50 % de la consommation.

Dans l'Union européenne, le taux de recyclage est de 45 %.

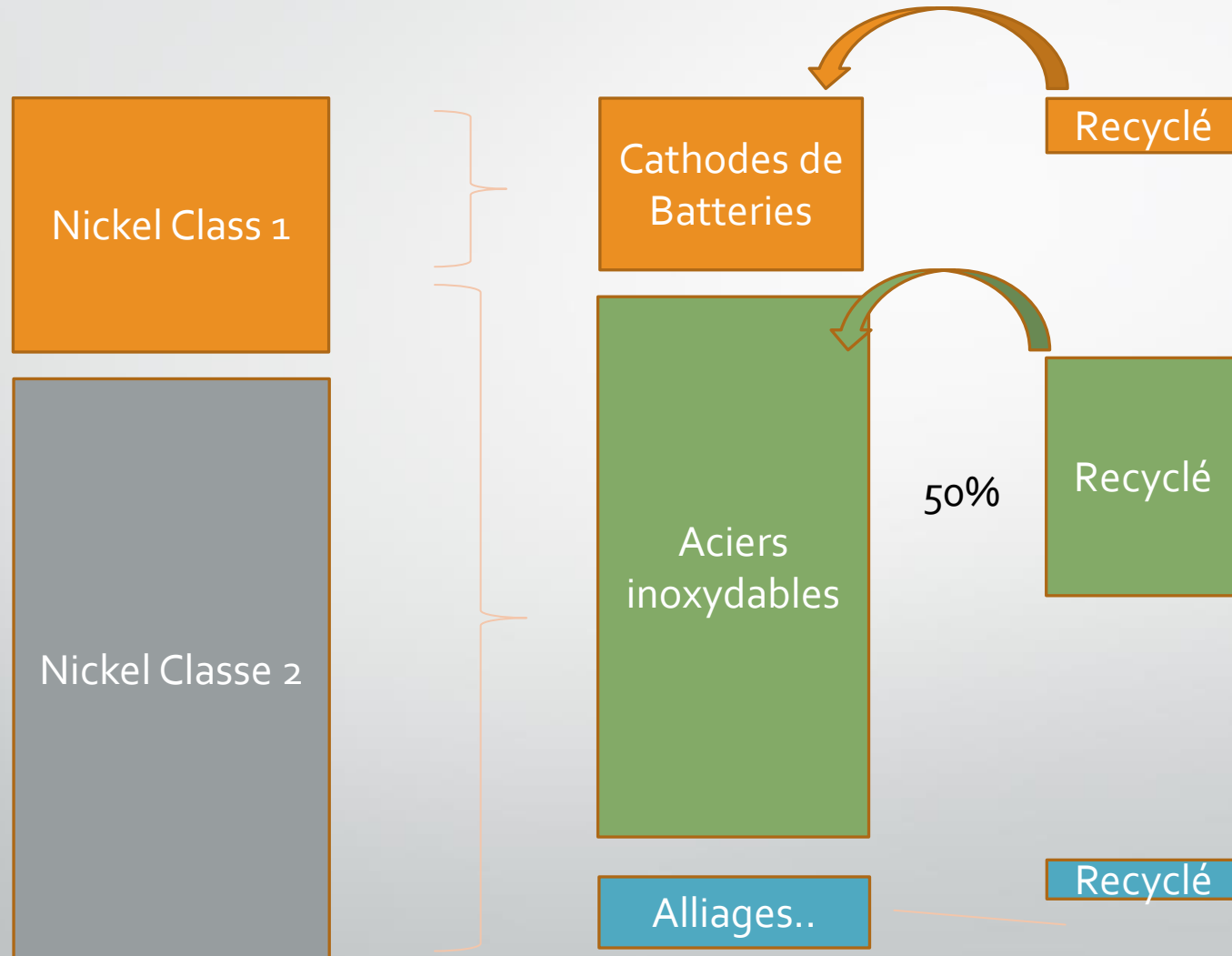
<https://lelementarium.fr/element-fiche/nickel/>

Nb : les taux de recyclage sont plus élevés en Europe et aux États-Unis parce qu'on y recycle plus que dans le reste du monde et que, d'autre part, il y a beaucoup d'importation de Ni intégré dans les biens de consommation



Taux de recyclage = 60% (End of life recycling rate)

Recyclage du Nickel par filière



Comment est recyclé le nickel dans l'acier ?

L'acier est facilement recyclable car il possède une propriété fondamentale, le **magnétisme**, utilisé pour leur séparation d'un stock de déchets, permet de les récupérer même s'ils ne sont pas triés à la source et quel que soit le mode de traitement de ces déchets

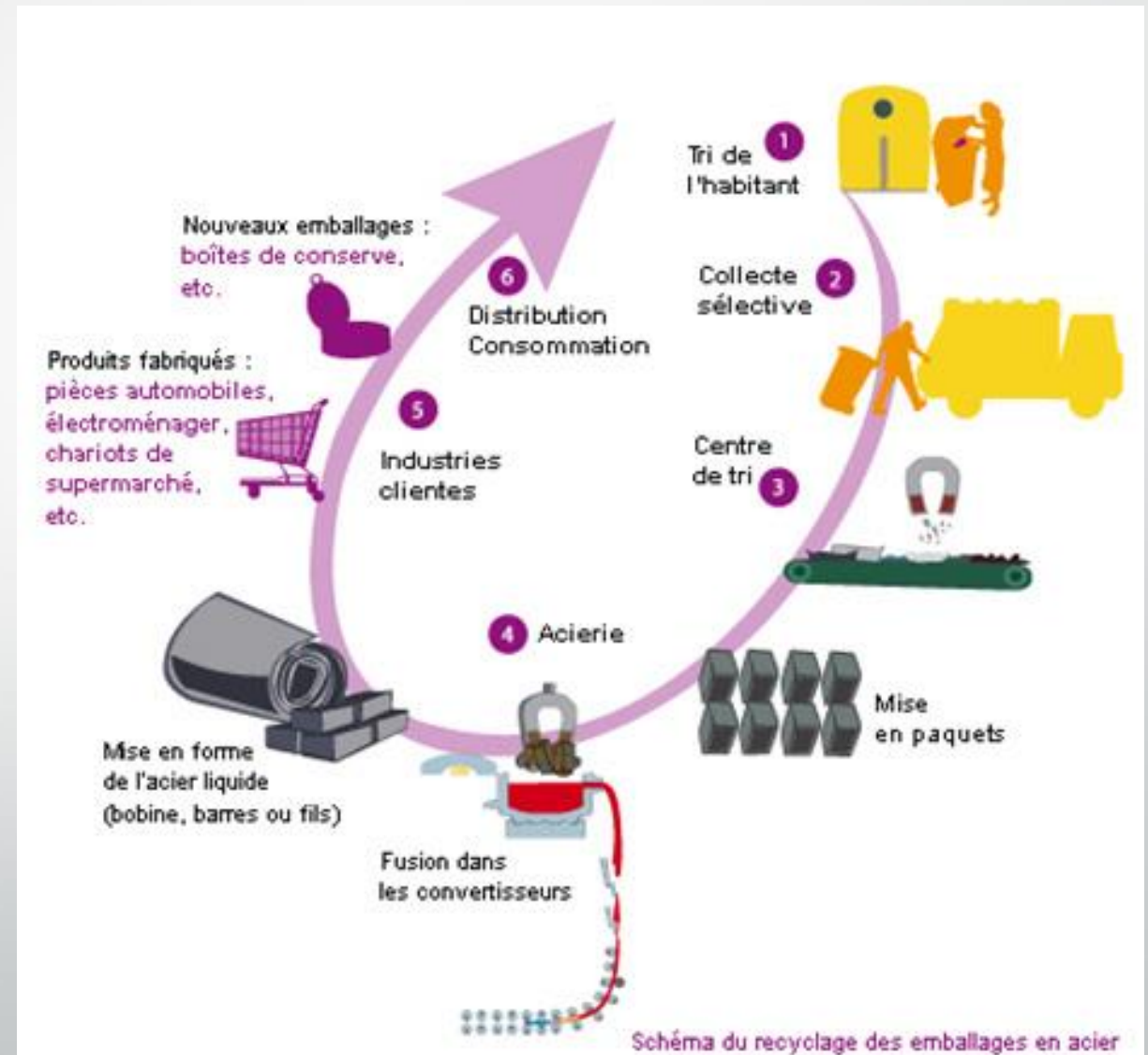
L'acier peut, en effet, être fabriqué indifféremment par les aciéries qui traitent le minerai par production de fonte ou par des aciéries électriques, qui traitent les ferrailles à recycler.

Processus :

Collecte par ferrailleurs :

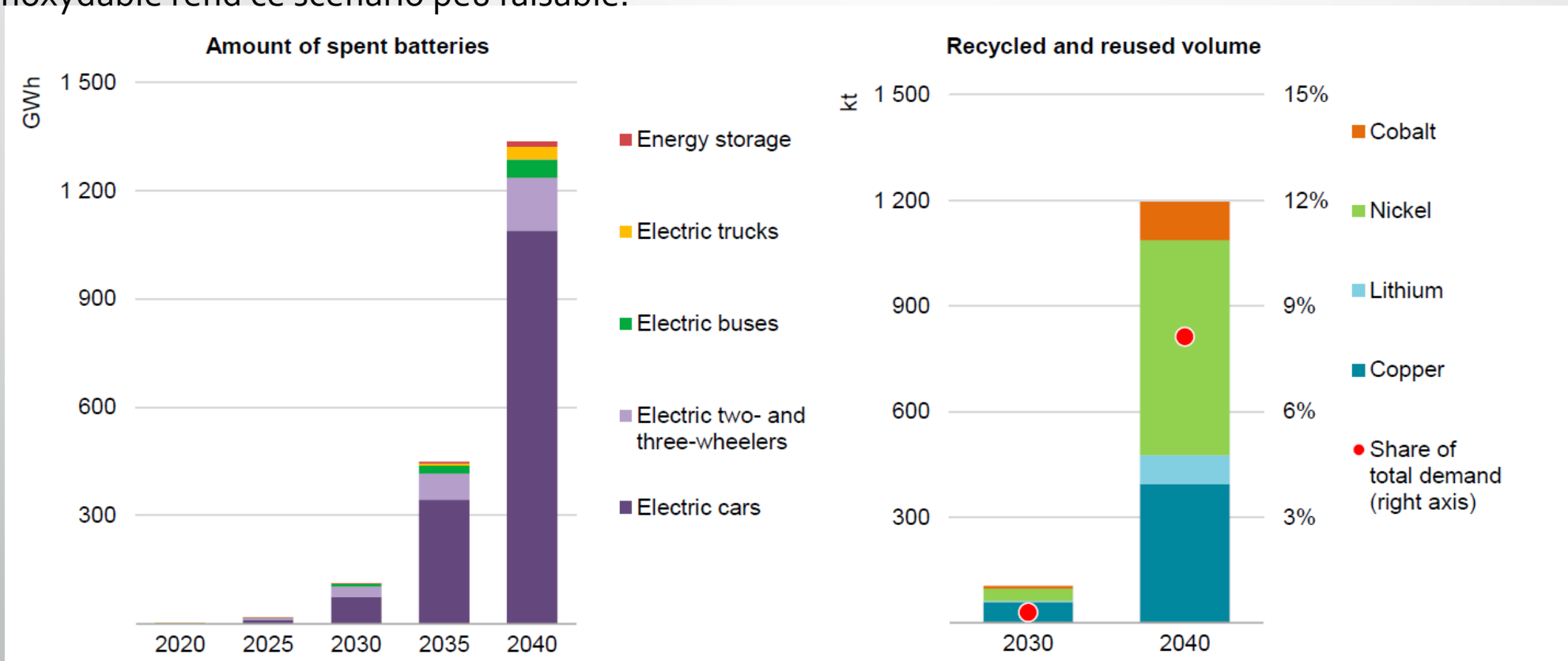
- Obsolète (équipements en fin de vie)
- Industrielle : déchet de fabrication
- Domestique (interne à l'acierie)

- => classées et envoyées aux aciéries ou fonderies pour être refondues et purifiées afin d'éliminer d'éventuels contaminants



Perspectives de demandes de nickel et enjeux du recyclage

Selon les scénarios de l'IAE (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY) : l'augmentation de la production de batteries de véhicules électriques impliquerait l'augmentation des besoins en Nickel recyclé.. Mais le problème de disponibilité des stocks de Nickel à recycler dans l'acier inoxydable rend ce scénario peu faisable.



Source : <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>

Nickel : augmentation de 50 kT à 650 kT

Enjeux du recyclage du nickel

Avantages environnementaux :

- Economie d'énergie : 90 % de gain d'énergie pour la production d'acier inoxydable.
- Réduction GES
- Réduction utilisation eau

Enjeux :

- Augmenter la collecte du nickel dans les aciers inoxydables et alliages
- Développer le recyclage des batteries
- Problématique : durée de vie du Nickel : 57% de tout le nickel déjà extrait du sol est encore en usage, grâce à la longue durée de vie des produits en acier inoxydable et en alliages.

=> ce qui limitera les quantités de Nickel recyclé disponibles pour accompagner les objectifs de production de batteries de voitures électriques.

Bibliographie

- Gaetan Montfort, ingénieur minier chez Koniambo Nickel SAS, Nouvelle Calédonie (témoignage recueilli pour le module)
- Cours de minéralogie d'Unilasalle Beauvais 2011 (tronc commun)
- Cours de métallogénie d'Unilasalle Beauvais 2012 (spécialité mines et carrières)
- Cours de géochimie d'Unilasalle Beauvais 2012 (spécialité mines et carrières)
- <https://lelementarium.fr/element-fiche/nickel/>
- <https://www.eramet.com/fr/activites/produits/nickel>
- <https://fr.institut-seltene-erden.de/ise-nickel-herstellung-vorkommen-verwendung/>
- <http://webmineral.com/>
- <https://www.mindat.org/>
- <https://fr.statista.com/statistiques/571211/reserves-mondiales-de-nickel--par-pays/>
- <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/mineral-requirements-for-clean-energy-transitions>
- <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/nickel-transition-energetique-pourquoi-parle-t-metal-du-diable>
- <https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/faits-mineraux-metaux/faits-sur-le-nickel/20601>
- <https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/#:~:text=The%20world's%20nickel%20oresources%20are,in%20laterite%2Dtype%20ore%20deposits.>
- https://www.lemonde.fr/international/article/2022/11/11/en-indonesie-ree-vers-le-nickel-or-noir-du-futur_6149502_3210.html?random=1358909631
- <https://www.policycenter.ma/publications/le-nickel-quels-enjeux-economiques-et-geopolitiques-lhorizon-2030>
- <https://la1ere.francetvinfo.fr/nouvellecaledonie/nickel-caledonien-metaux-industriels-soumis-aux-incertitudes-geopolitiques-463077.html>
- <https://greenhired.fr/nickel-et-enjeux-geopolitiques/>
- <https://insg.org/>
- https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/08/11/forte-de-ses-reserves-en-nickel-l-indonesie-parie-sur-l-industrie-de-la-voiture-electrique_6137756_3234.html
- https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/01/21/en-nouvelle-caledonie-la-filiere-nickel-aux-abois_6067009_3234.html
- https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/03/04/les-forces-politiques-de-nouvelle-caledonie-s-accordent-sur-le-rachat-de-l-usine-de-nickel-vale_6071917_3234.html
- https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/03/05/vente-de-l-usine-caledonienne-de-nickel-de-goro-mais-que-vient-donc-faire-elon-musk-dans-cette-galere_6072057_3234.html