

Exploration, préservation et exploitation des ressources minérales de l'océan profond : où en sommes-nous ?

Sauvons le Climat - Université d'été Brest du 7 au 10 octobre 2025

Sébastien Ybert
Ifremer

08/10/2025

Quelles ressources minérales?

Gouvernance

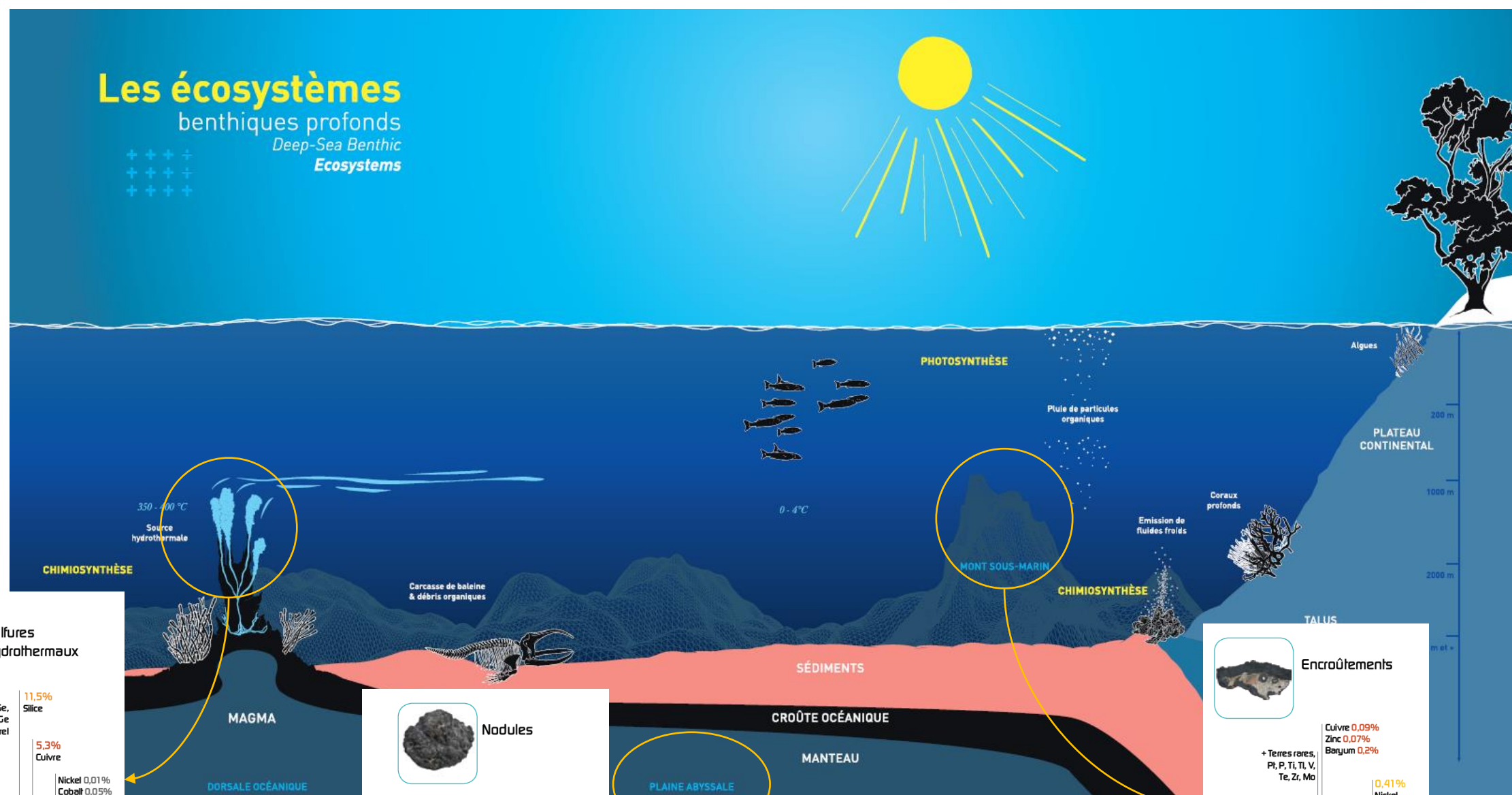
Connaissances et enjeux

Actualité

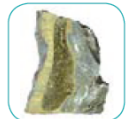
Les écosystèmes

benthiques profonds
Deep-Sea Benthic
Ecosystems

++++
++++
++++

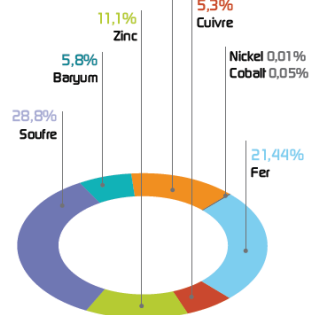


1500 à
3000 m de
profondeur



Sulfures
hydrothermaux

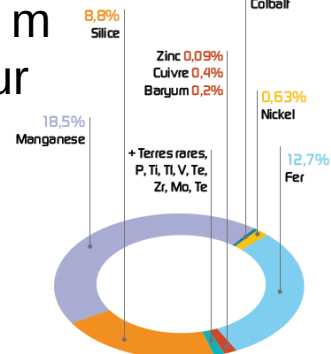
+ Au, Ag, Pb, Co, In, Ge,
Se, Co, Cd, Bi, Te, Ga, Ge
+ Hydrogène naturel



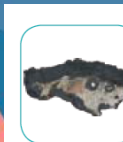
4000 à 6000 m
de profondeur



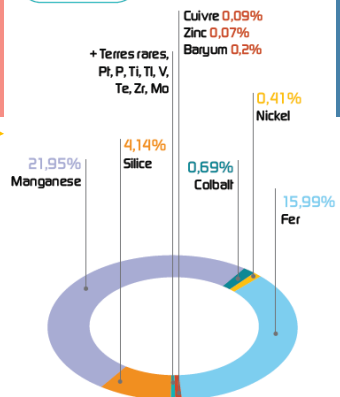
Nodules



800 à 2400 m
de profondeur



Encroûtements

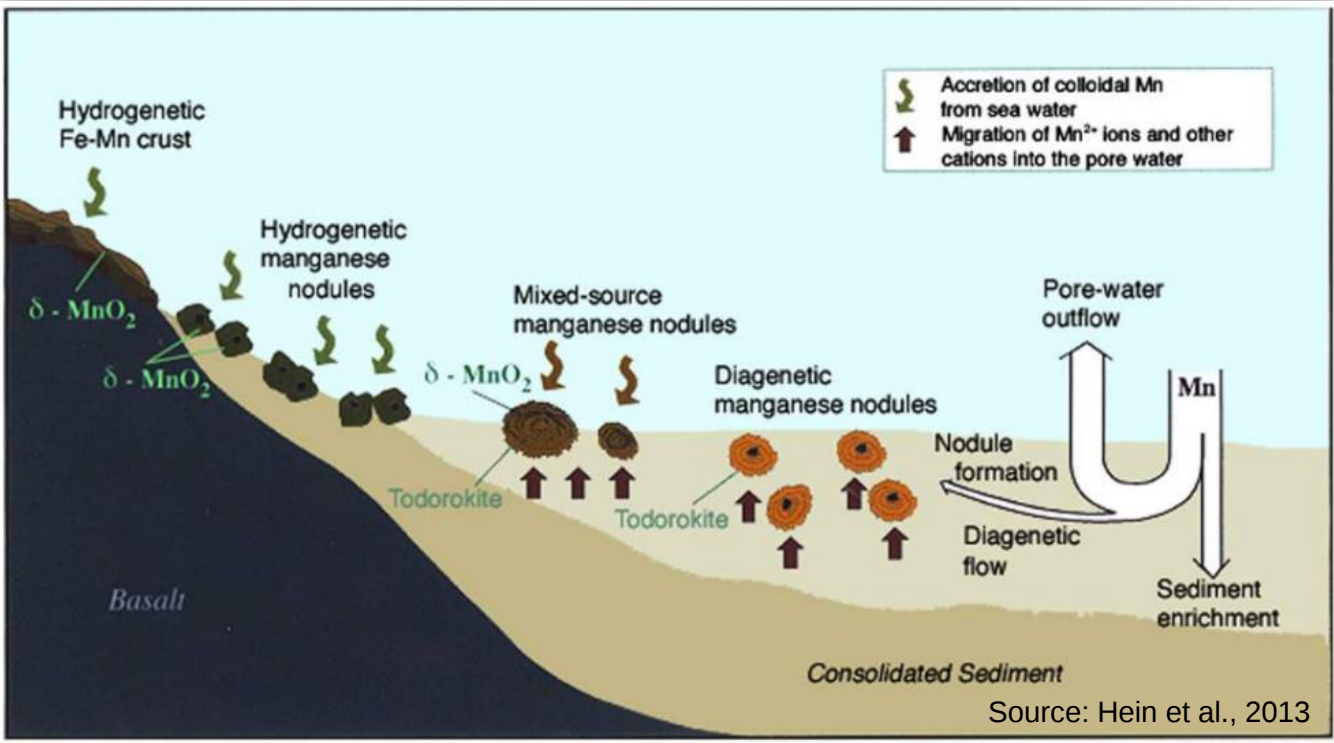


Ifremer

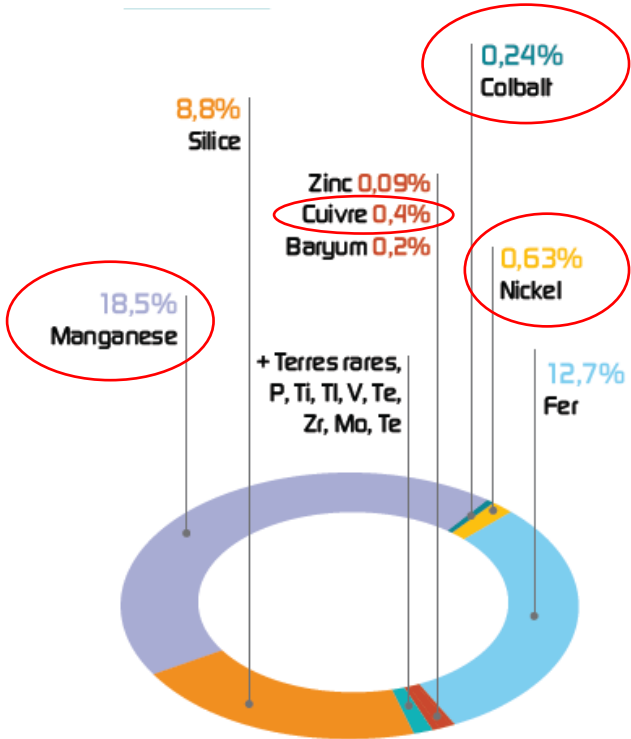
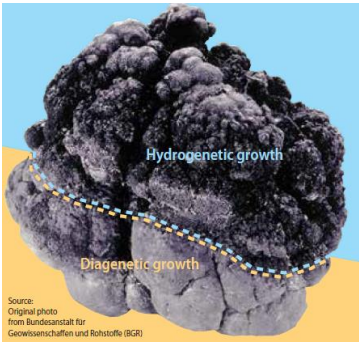
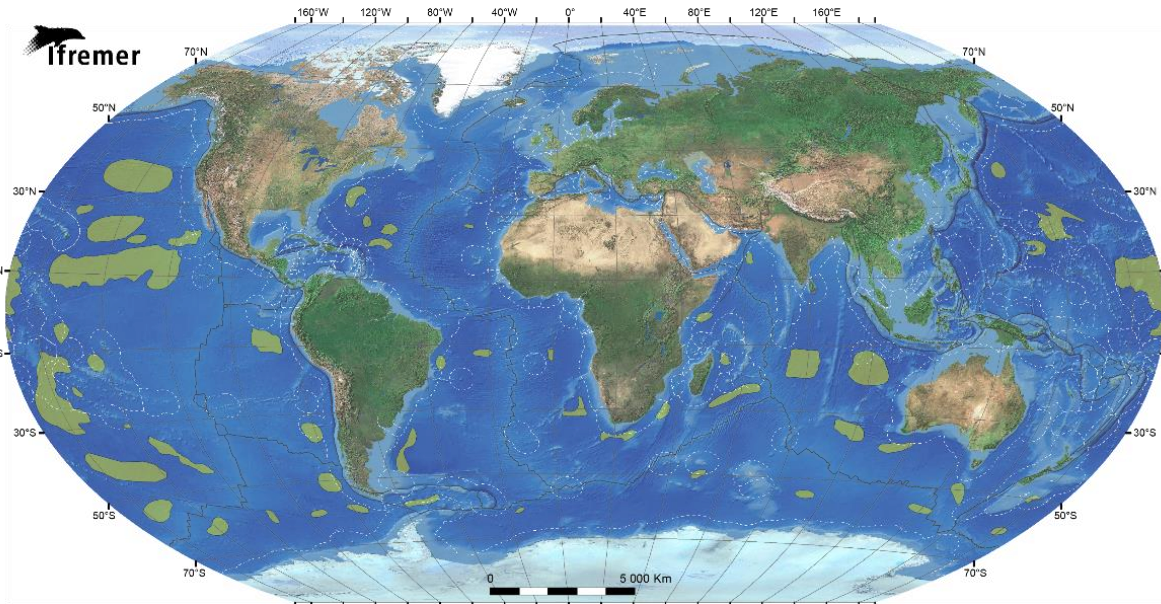
08/10/2025

Ressources minérales des grands fonds marins.

Les nodules polymétalliques



Taux de croissance : 2-250mm/Ma
Taille typique 2-12cm diamètre



Source: Fouquet, Lacroix 2011. Synthèse prospective



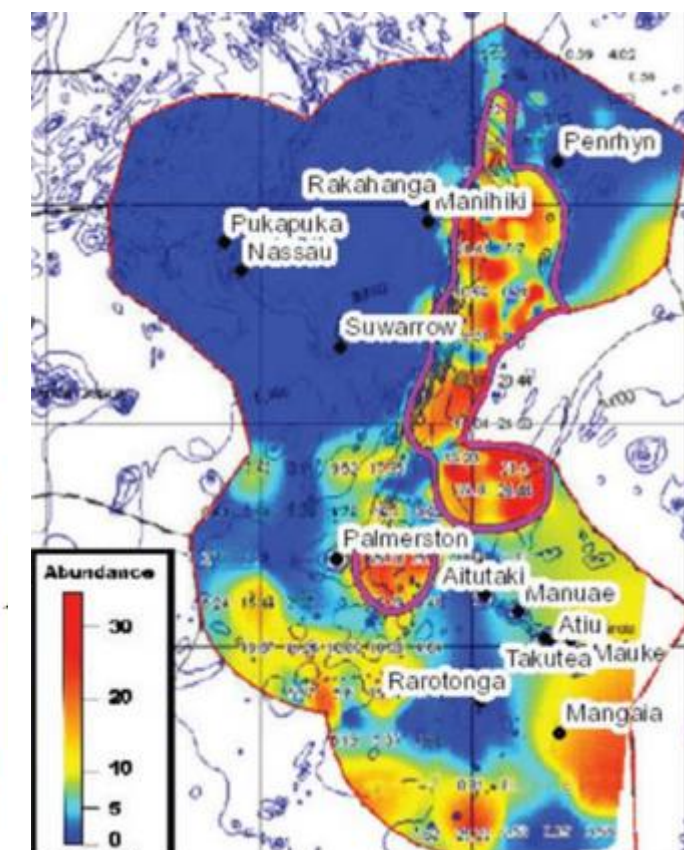
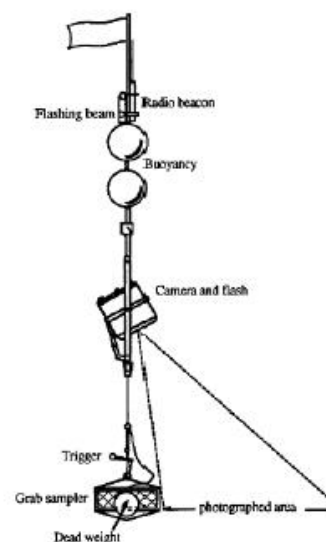
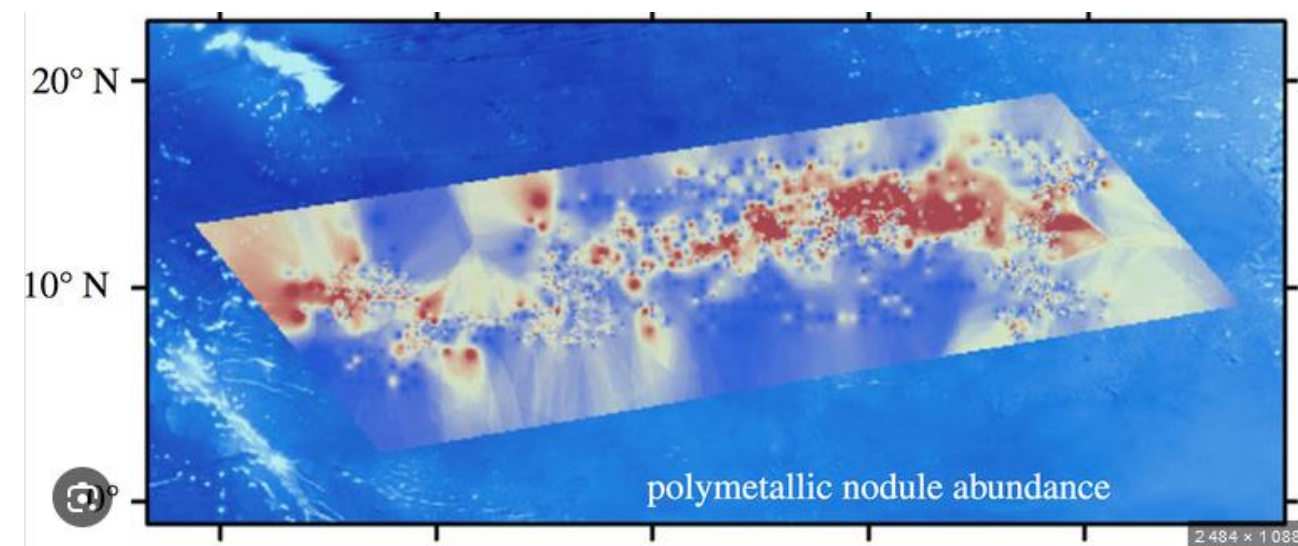
Les nodules polymétalliques

Quantités très importantes

Ex : estimation CCZ = 21.1 Gt (Hein and Mizell, 2022) – **Mais ceci n'est pas une ressource au sens minier et a fortiori pas des réserves**

Contrats d'exploration: 75 000 km²

Paramètre clé : l'abondance (kg/m²)



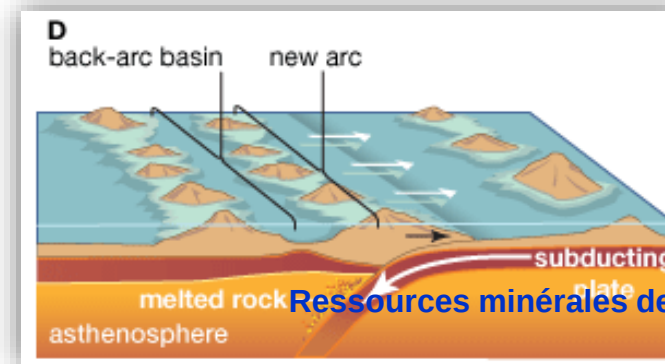
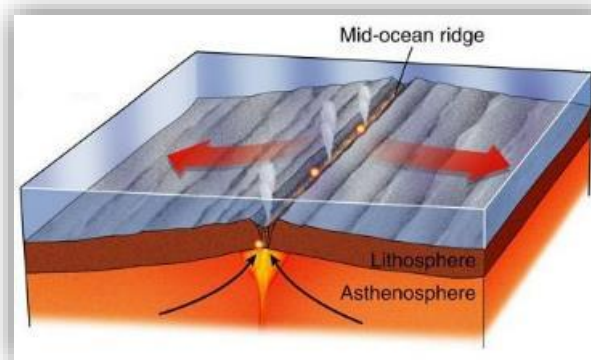
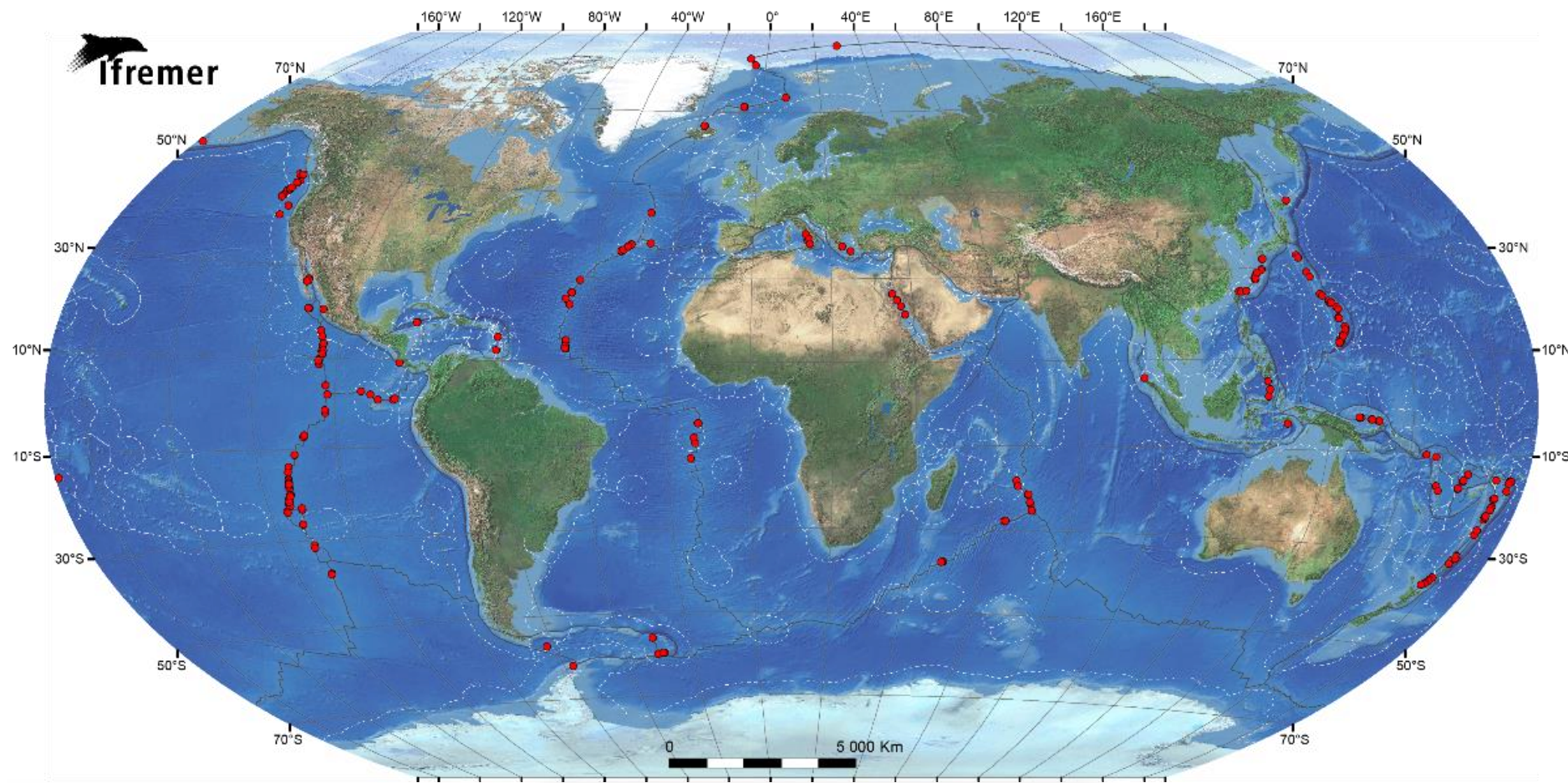
Les sulfures hydrothermaux

>350 sites actifs dans tous les océans

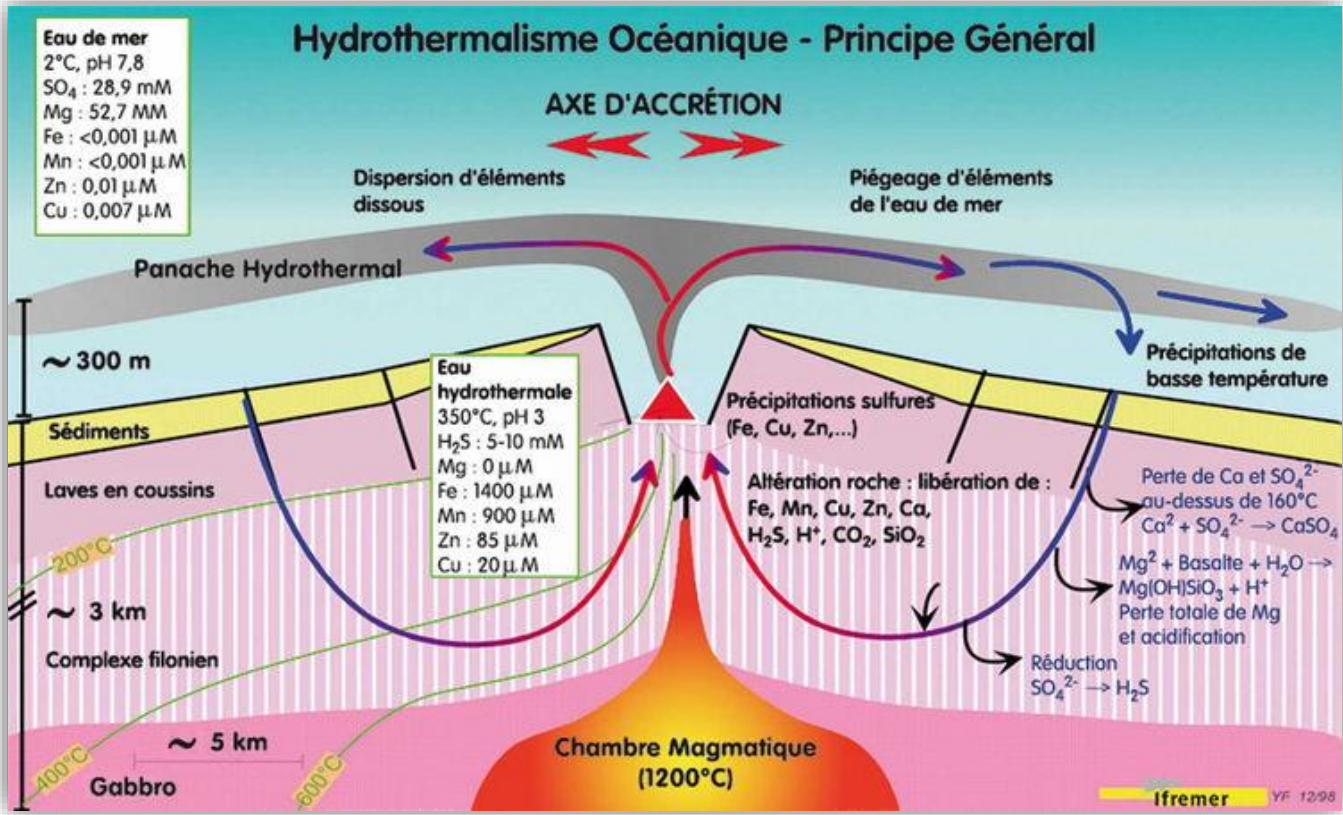
1000-5000m

Limite de plaque tectonique divergente :

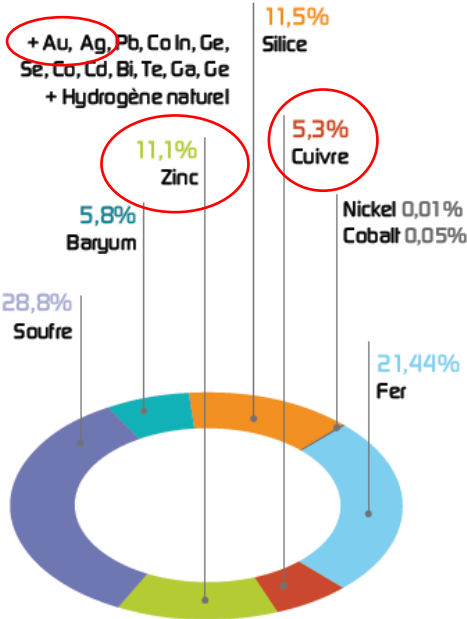
- Dorsales (67k km)
- Arcs volcaniques (22k km)
- Bassins arrière-arc
- Point-chaud



Les sulfures hydrothermaux



Sulfures hydrothermaux



Source: Fouquet, Lacroix 2011. Synthèse prospective

Element	Intraoceanic Back-Arc Ridges	Intracontinental Back-Arc Ridges	Mid-Ocean Ridges
Pb (wt.%)	0.4	11.8	0.1
Fe	13.0	6.2	26.4
Zn	16.5	20.2	8.5
Cu	4.0	3.3	4.8
Ba	12.6	7.2	1.8
As (ppm)	845	17,500	235
Sb	106	6,710	46
Ag	217	2,304	113
Au	4.5	3.1	1.2
(N)	573	40	1,259



Les encroûtements cobaltifères

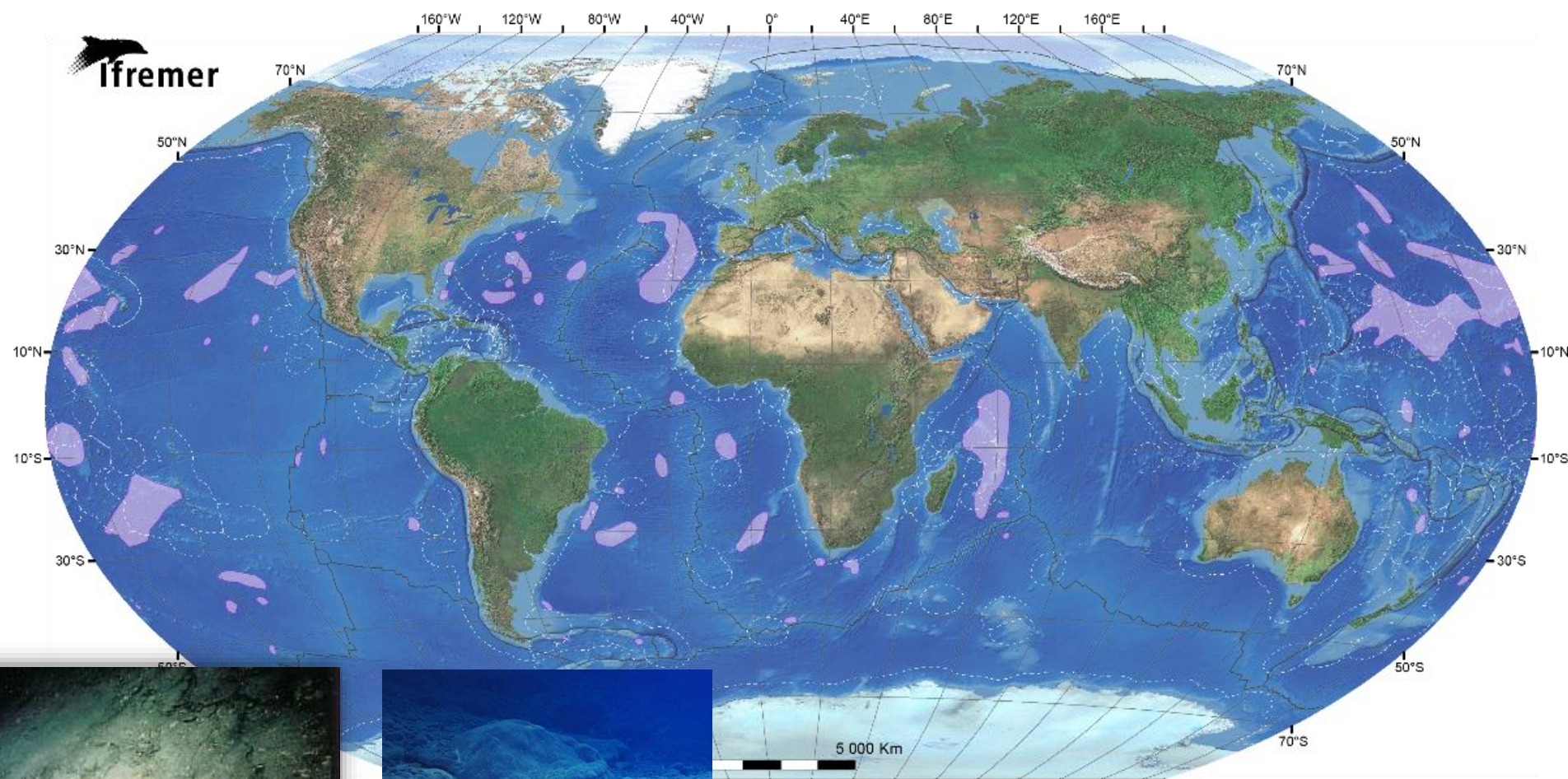
Zones permissives

400-7000m (800-2500m ++)

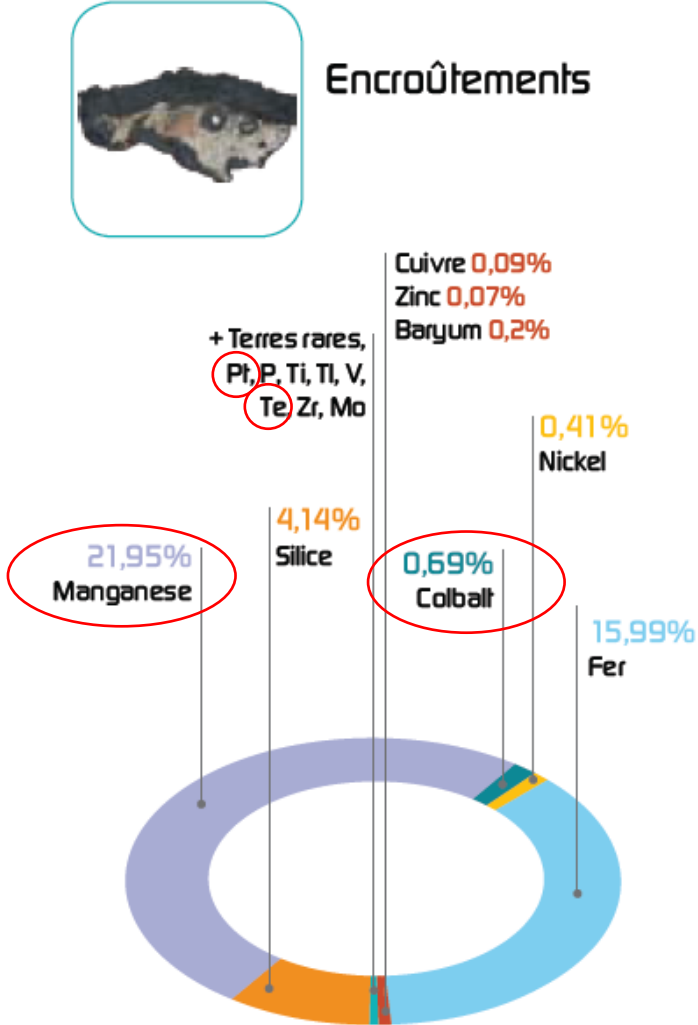
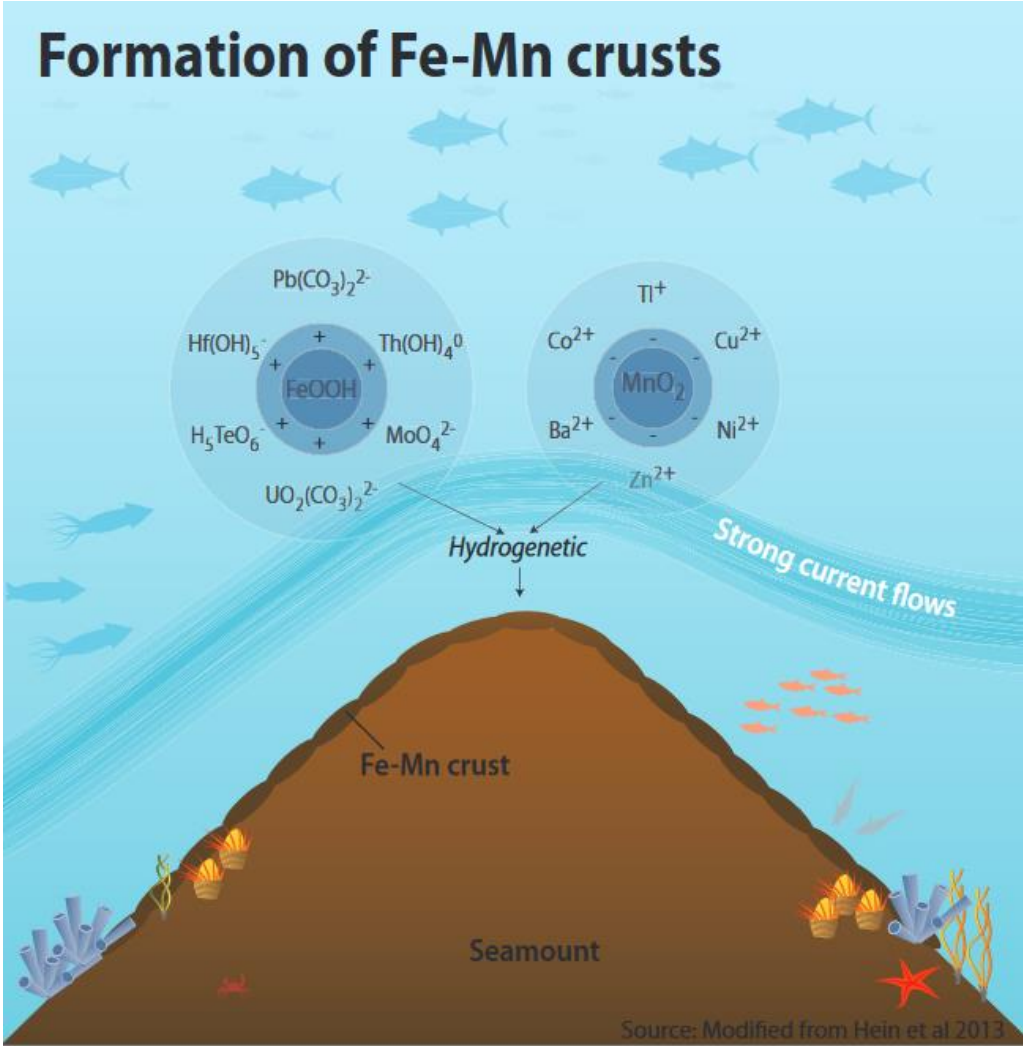
Structures >10Ma

Sédimentation faible (<2cm/ka)

- Monts sous-marins
- Guyots
- Rides volcaniques
- Plateaux
- Anciens atolls
- ...



Les encroûtements cobaltifères



Source: Fouquet, Lacroix 2011. Synthèse prospective

Ressources vs Réserves

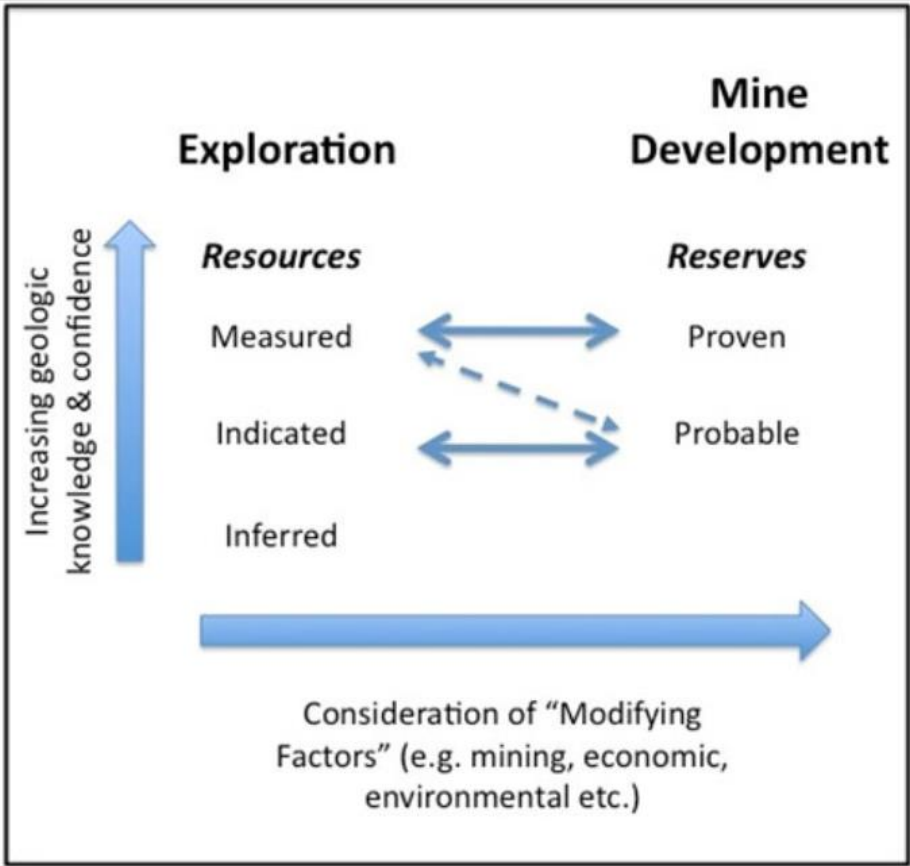
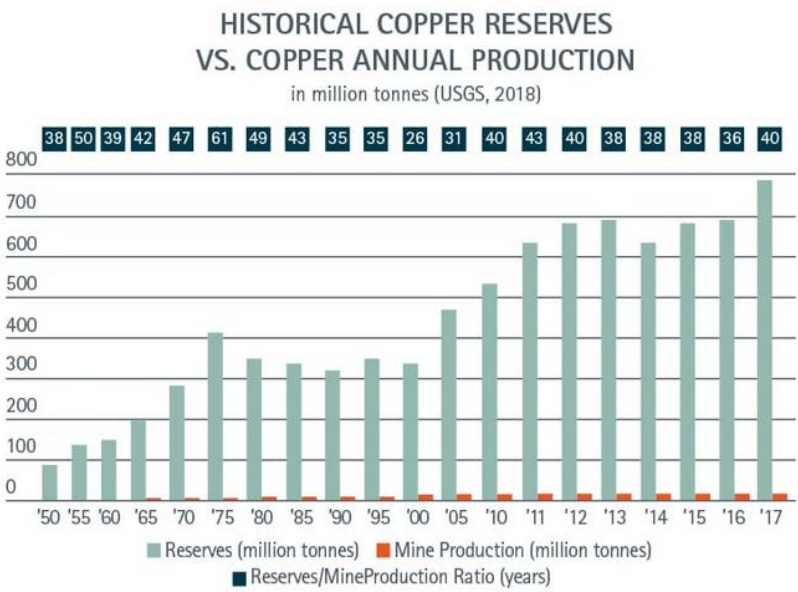
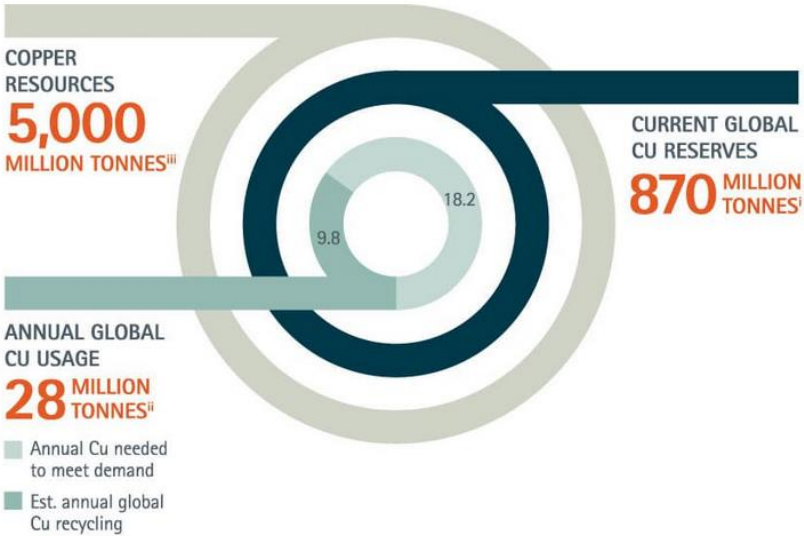
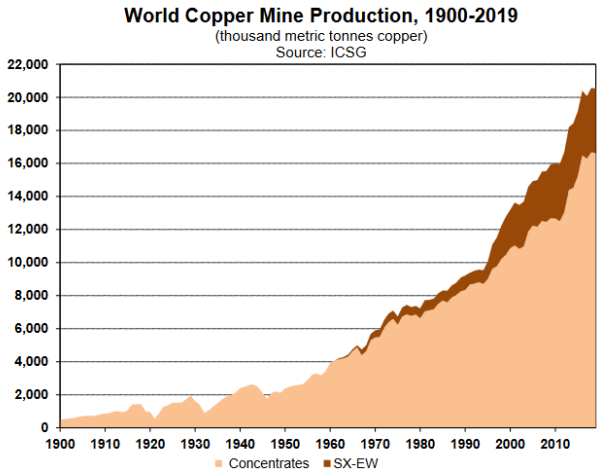


Figure 1. Resources and Reserves: The relationships between the five groups of mineral asset reporting.
Source: <https://www.geologyforinvestors.com/classification-of-mineral-resources-and-reserves/>



Source: International Copper Association.
<https://internationalcopper.org/fr/sustainable-copper/about-copper/cu-demand-long-term-availability/>



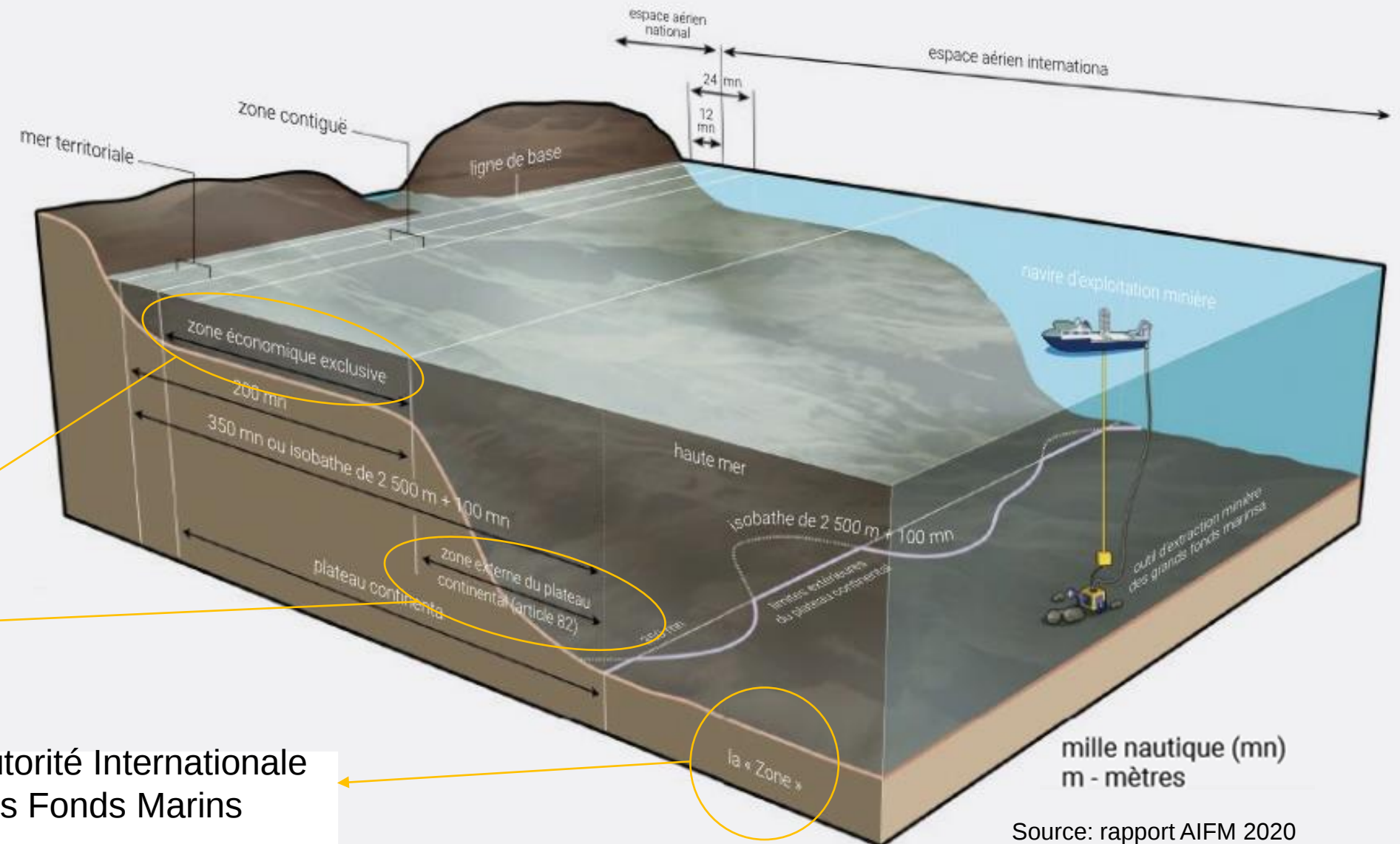
Since 1900, when world production was less than 500 thousand tonnes copper, world copper mine production has grown by 3.2% per annum to 20.5 million tonnes in 2019. SX-EW production, virtually non-existent before the 1960s, stood at 3.9 million tonnes in 2019.
https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2021/01/2020_10_13_ICSG_Factbook_2020.pdf



2

Gouvernance

Les espaces maritimes tels que codifiés par la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM) de 1982



Juridictions
nationales



Autorité Internationale
des Fonds Marins

Source: rapport AIFM 2020

Définition et gestion des ressources de la Zone

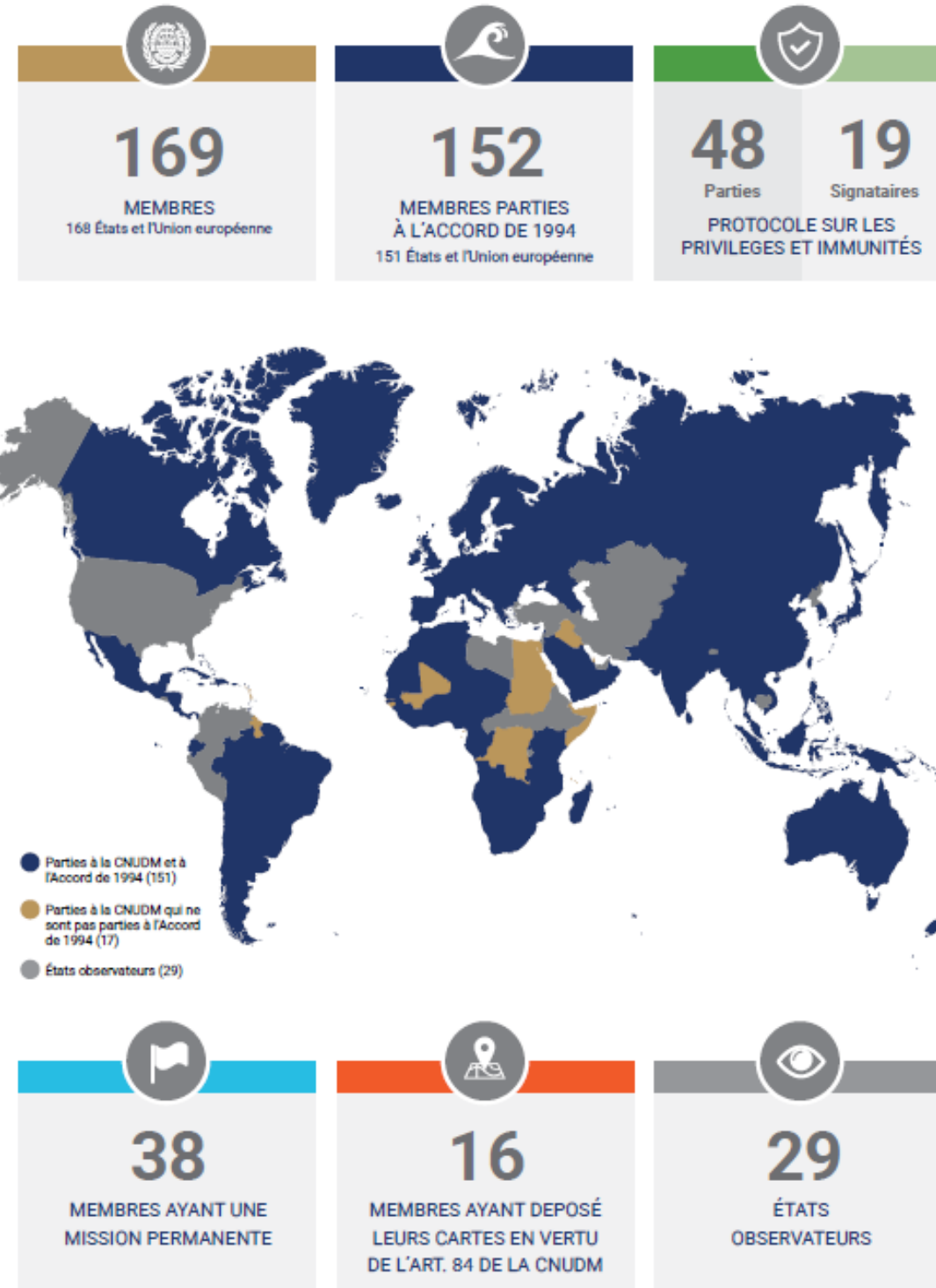
Article 133 (Partie XI relative à la Zone)

- a) On entend par « ressources », toutes les ressources minérales solides, liquides ou gazeuses in situ qui, dans la Zone, se trouvent sur les fonds marins ou dans leur sous-sol, y compris les nodules polymétalliques,
- b) Les ressources, une fois extraites de la Zone, sont dénommées « minéraux ».

Article 125: « La Zone et ses ressources sont le patrimoine commun de l'humanité ». Suivant le principe d'un patrimoine mondial commun, l'article 137 dispose de manière restrictive que la Zone et ses ressources sont inaliénables.

L'Article 140 précise que les activités menées dans la Zone le sont dans l'intérêt de l'humanité toute entière et que l'Autorité (= l'AIFM) assure le partage équitable, sur une base non discriminatoire, des avantages financiers et autres avantages économiques tirés des activités menées dans la Zone

L'AIFM



Source: rapport annuel SG AIFM 2024



GLOBAL TIDE OF OPPOSITION TO DEEP-SEA MINING.

BE THE NEXT COUNTRY TO SAY NO TO **DEEP-SEA MINING.**

2022

 Palau
 Fiji
 Samoa
 Chile
 Costa Rica
 Ecuador
 Federated States of Micronesia
 Spain
 New Zealand
 France
 Germany
 Panama

2023

 Vanuatu
 Dominican Republic
 Switzerland
 Sweden
 Ireland
 Canada
 Brazil
 Finland
 Portugal
 Monaco
 United Kingdom
 Mexico

2024

 Kingdom of Denmark
 Greece
 Peru
 Malta
 Honduras
 Tuvalu
 Guatemala
 Austria

2025

 Luxembourg
 Slovenia
 Cyprus
 Latvia
 Marshall Islands
 Croatia

38

COUNTRIES
SAY NO TO

DEEP-SEA MINING.

Exploration for minerals in the Area

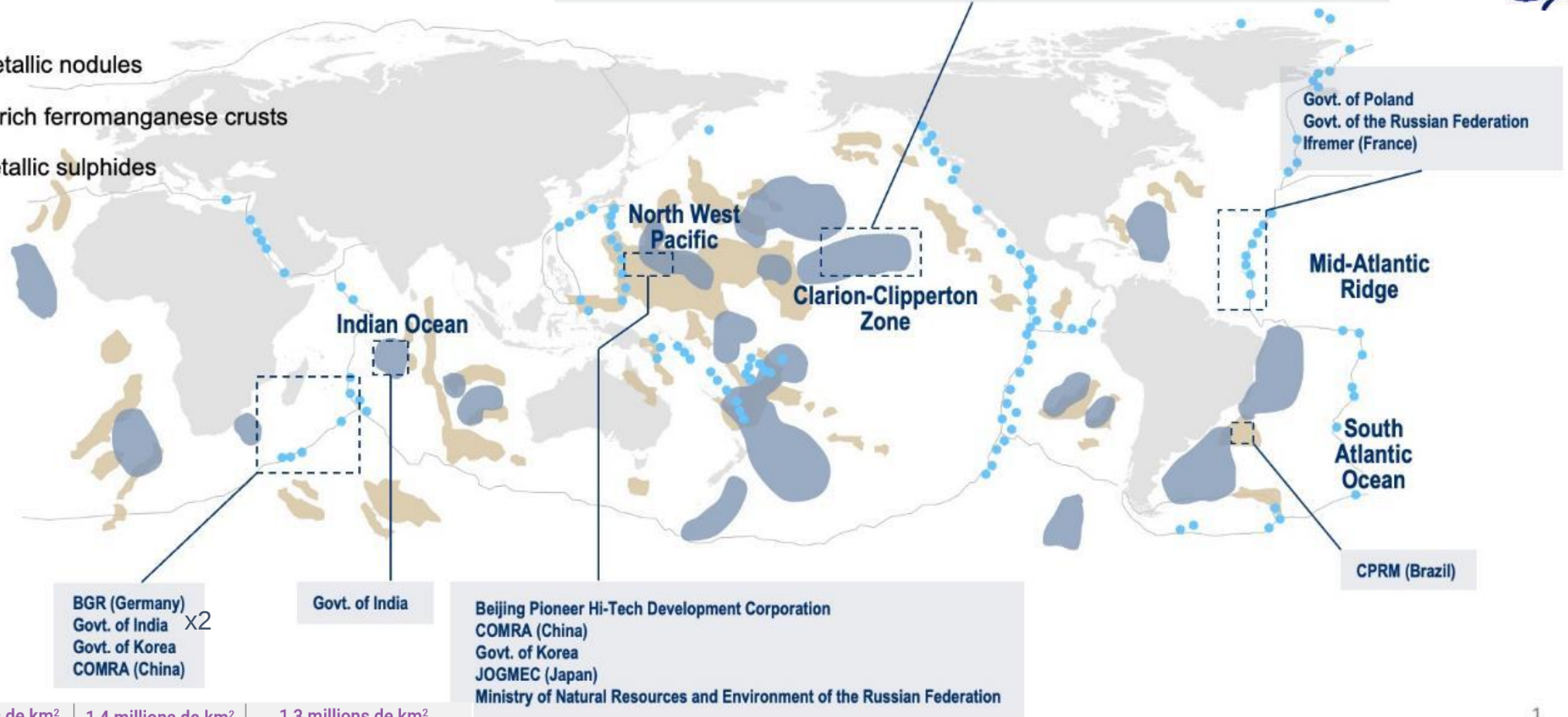


BGR (Germany)
BMJ (Jamaica)
CIIC (Cook Islands)
CMC (China)
COMRA (China)
DORD (Japan)

GSR (Belgium)
Government of Korea
Ifremer (France)
IOM (Bulgaria, Czech Republic,
Poland, Russian Federation, Slovakia)
Marawa (Kiribati)

NORI (Nauru)
OMS (Singapore)
TOML (Tonga)
UKSRL (UK)
Yuzhmorgeologiya (Russian Federation)

- Polymetallic nodules
- Cobalt-rich ferromanganese crusts
- Polymetallic sulphides



30 contrats
d'exploration
accordés par l'AIFM
à 22 pays, parmi lesquels
12 États en développement

1,4 millions de km²
en cours
d'exploration

1,4 millions de km²
protégés de
l'exploitation
minière dans la ZCC

1,3 millions de km²
contribués en tant que
« zones réservées »
par les explorateurs aux États
en développement
891 138 km² actuellement disponibles



Toutes les données et informations relatives aux fonds marins et à la colonne d'eau associée collectées lors des activités d'exploration, sont systématiquement mises à disposition au travers de la base de données de l'AIFM, DeepData.

08/10/2025

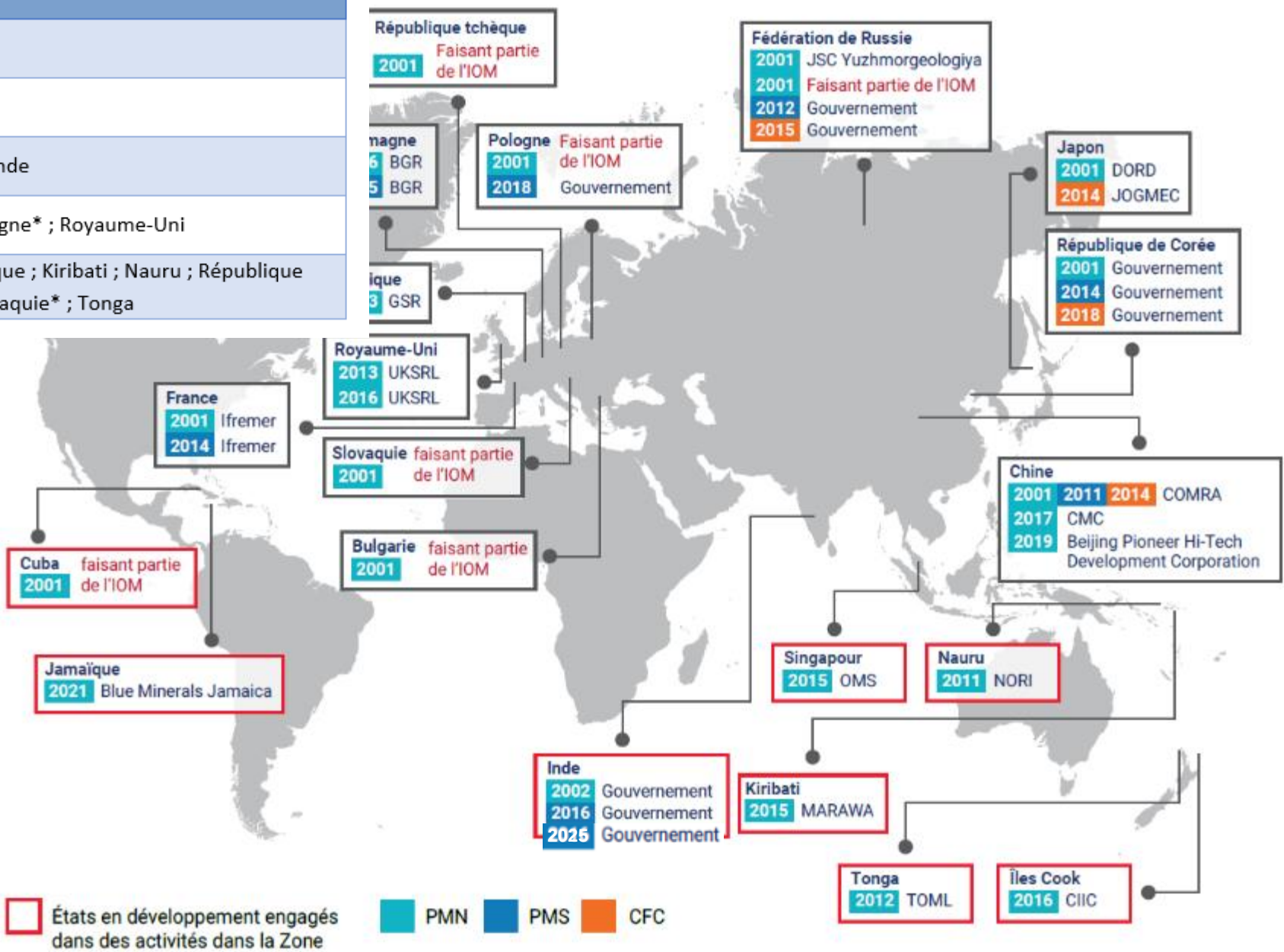
Ressources minérales des grands fonds marins.

16

Tableau 5 : Répartition des pays en fonction du nombre de contrat d'exploration AIFM détenus ou patronnés. * Dont un contrat dans le cadre du groupement de pays (Bulgarie, Cuba, République Tchèque, Pologne, Russie et Slovaquie).

Nombre de contrats AIFM	Pays
5	Chine
4	Russie*
3	Corée du Sud ; Inde
2	Allemagne ; France ; Japon ; Pologne* ; Royaume-Uni
1	Belgique ; Bulgarie* , Cuba* , Iles Cook ; Jamaïque ; Kiribati ; Nauru ; République Tchèque* ; Singapour ; Slovaquie* ; Tonga

4 industriels (TMC, Allseas, GSR, Loke Minerals – maintenant Glomar Minerals) détiennent ou sont impliqués dans un total de 8 contrats d'exploration des nodules sur 19



3

Pourquoi s'y intéresser sur le plan des ressources?

Des ressources nécessaires ?

- Augmentation de la demande : nucléaire, automobile, nouvelles technologies et énergies renouvelables
- Diminution des teneurs des ressources continentales
- Enjeux géopolitiques
- Ressources abondantes dans les fonds marins ?

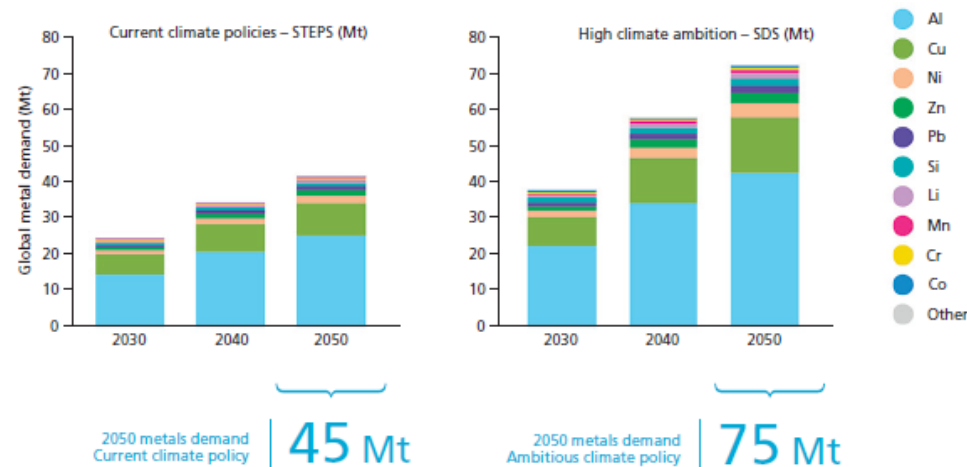


Figure 2. Global metal demand for clean energy technologies (KU Leuven 2022) on the basis of current and ambitious climate policies. Abbreviations: Mt, million tonnes; SDS, Sustainable Development Scenario; STEPS, Stated Policies Scenario.

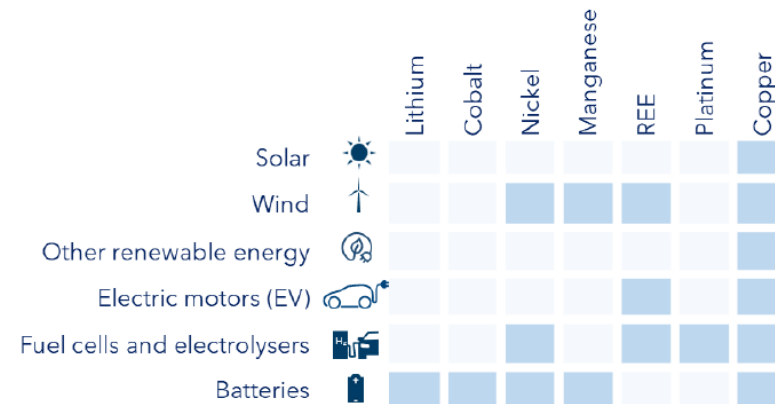
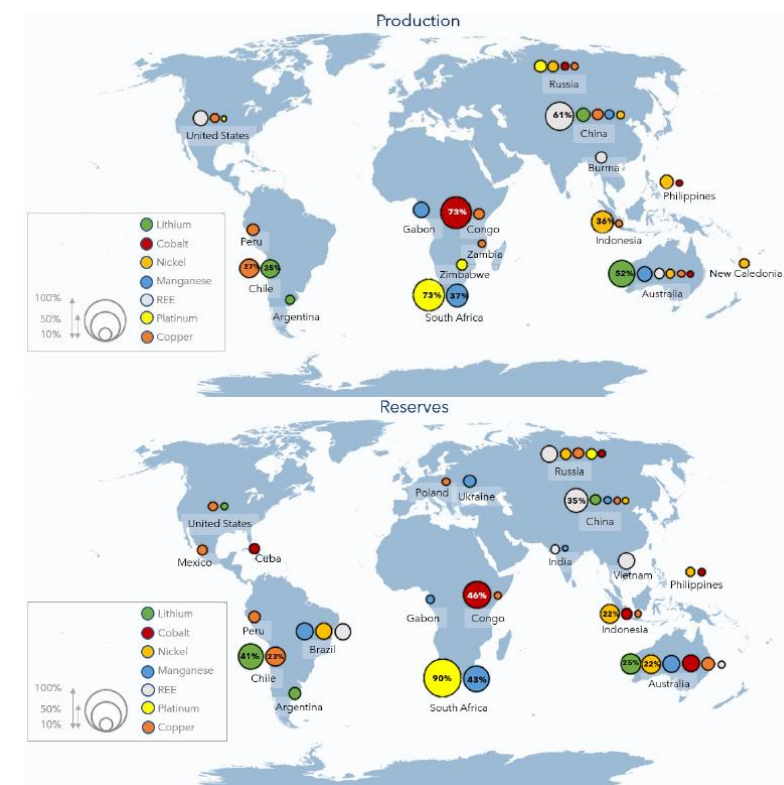


Figure 1 Use of critical minerals by low-carbon technologies covered in this report



SINTEF Report 2022 – The future is circular

Des ressources nécessaires?

Ex. étude CARDNO, 2016 pour les îles Cook

Table 4-5 Basic Assumptions used in Cook Islands Mining Scenario

Category	Assumptions Used
Total mineable area	2,705 km ²
Distance from nearest island	>300 km
Nearest processing facility ¹	Mexico (8,000 km)
Total estimated resource potential (dry tonnes)	50,000,000
Annual estimated resource potential (dry tonnes)	2,500,000
Duration of mining operation	20 years
Area mined per year	135 km ²
Collection efficiency	80%
Metallurgic Processing	Assume best available technology

Note 1: The CBA assumes the nearest existing processing facility is in Mexico | Mineral Authority. It is possible that a suitable processing facility could also be

Surface Unité Urbaine de Paris ~2 800 km²

Surface Paris ~110 km²

Table 4-6 Contained Metal (in dry tonnes per year) in Cook Islands Mine Site

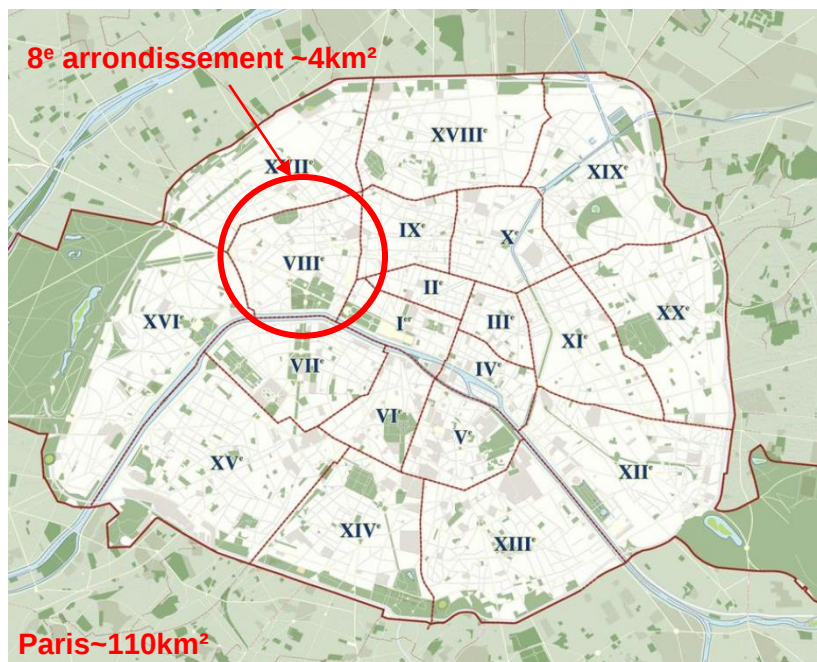
Metal	Value from Hein et al. (2015)	Minimum	Most Likely	Maximum
Manganese	392,128	244,598	310,844	374,529
Titanium	25,804	13,168	21,021	32,117
Cobalt	13,323	7,645	10,209	12,912
Nickel	6,444	3,924	5,164	6,785
Copper	3,467	1,874	3,432	6,144
Sum of REEs and Yttrium	5,357	3,011	4,331	6,749



Des ressources nécessaires?

Ex. étude CARDNO, 2016 pour les îles Cook

Rappel hypothèse de surface annuelle exploitée 135 km²



Mn (prod. annuelle mondiale 20Mt):

- Hypothèse production de Mn de l'ordre de 310 000 t/an

La mine de Moanda (Gabon - Eramet), 1^{ère} mine Mn mondiale en 2023:

- 7,5 Mt produites en 2022
- Surface de la mine (à ciel ouvert) environ 400 ha, soit 4 km²

Cu:

- Hypothèse production de Cu de l'ordre 3 432 t/an

La mine d'Escondida (Chili), plus grosse mine de cuivre au monde:

- Env. 1,2 Mt (plus de 300x plus)
- Surface de la mine de l'ordre de 25 km², soit plus de 5 fois moins que la surface de l'exploitation annuelle dans le scénario d'exploitation aux îles Cook

Des ressources nécessaires?

Table 2 | World Production and Known Terrestrial Reserves of Critical Minerals 2022⁸

	Production (metric tons)	Known Terrestrial Reserves (metric tons)
Cobalt	190,000	8,300,000
Copper	26,000,000	890,000,000
Manganese	20,000,000	1,700,000,000
Molybdenum	250,000	12,000,000
Nickel	3,300,000	> 100,000,000

Source: US Geological Survey.

Alger et al. 2025, <https://www.nature.com/articles/s44183-025-00127-4>

Un intérêt social et économique?

Nickel - pureté de 99,80 % - LME (London Metal Exchange) - Au comptant - Prix en dollars par tonne

mars 2025 : 16 044,0dollar US

dollar US



Source: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010002060#Graphique>

Cobalt - pureté minimale de 99,80% - LME (London Metal Exchange) - contrats à terme à la 1ère échéance - Prix en dollars US par tonne

mars 2025 : 31 318,0dollar US

dollar US



Source: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010767319#Graphique>



Des ressources... à exploiter ?

« The argument that deep-sea mining is essential to meet the demands for critical materials is thus contested and does not support the urgency with which exploitation of deep-sea minerals is being pursued »

Source: Note EA-SAC Juin 2023 - Deep-Sea Mining: assessing evidence on future needs and environmental impacts

Les viabilités technique et économique de l'exploitation des fonds marins restent controversées

Source: Rapport d'étude SystExt Novembre 2022 - Controverses minières

The ISA (2022a) study concluded that land-based sources could meet demand in all scenarios except those with the highest growth, so that deep-sea sources may lead to oversupply and price reductions, and/or land-based projects being abandoned.

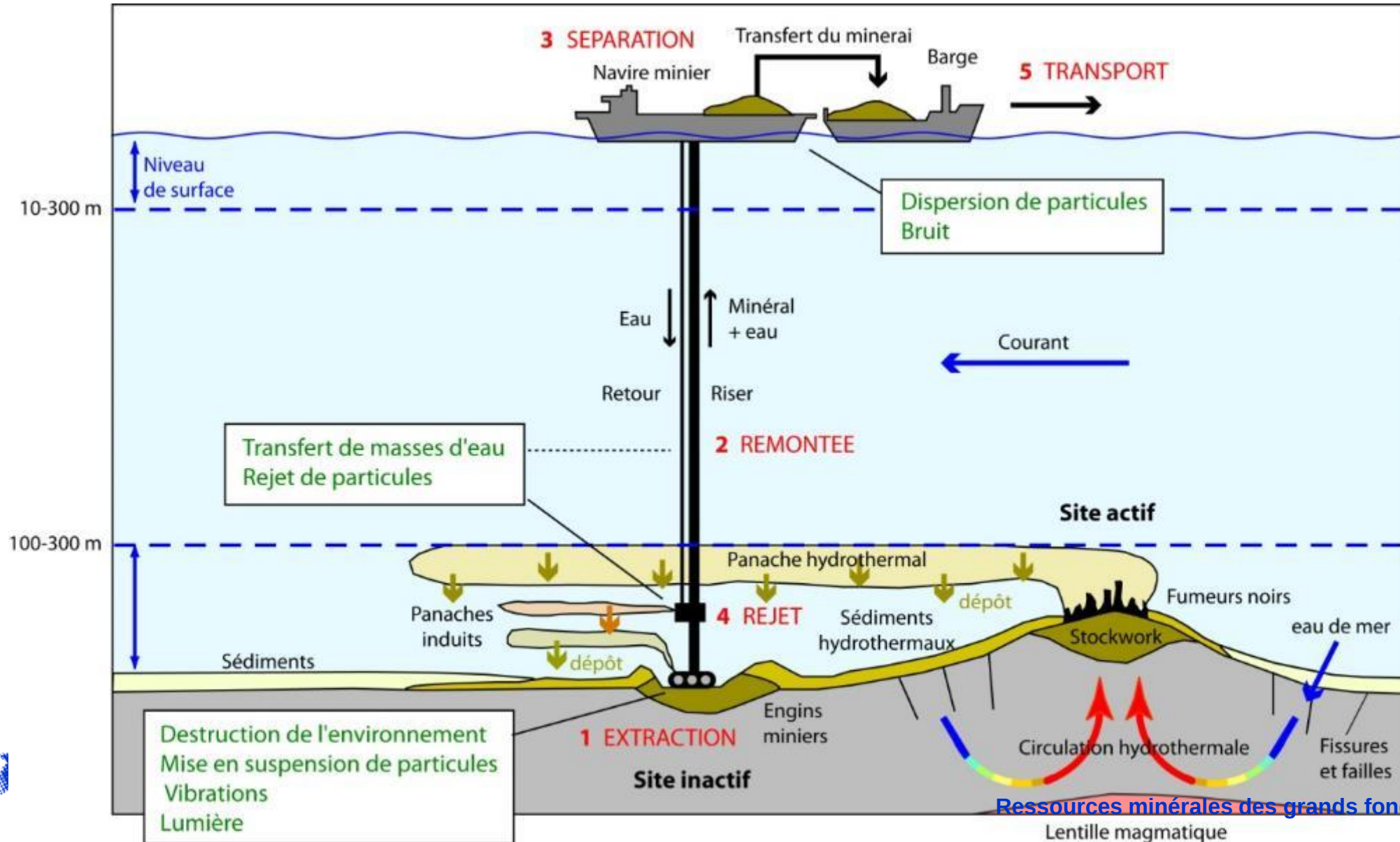
Should prices for one or more of the four main metals fall, this could result in seabed mining projects becoming sub-economic or unprofitable.

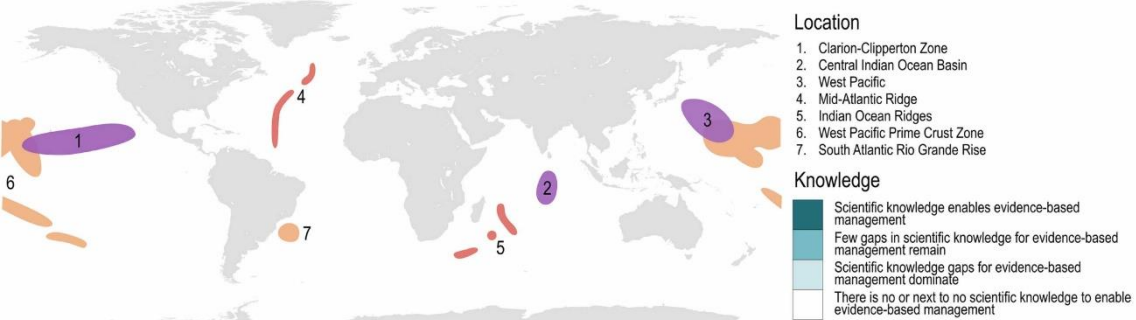
There is thus considerable uncertainty about both the economic prospects and the associated disruptions in the many countries hosting land-based metal mines (Table 1). The latter must be considered because the ISA is obligated to operate an assistance fund derived from mining royalties to compensate for economic disruption in developing nations dependent on mining exports.



Les risques environnementaux

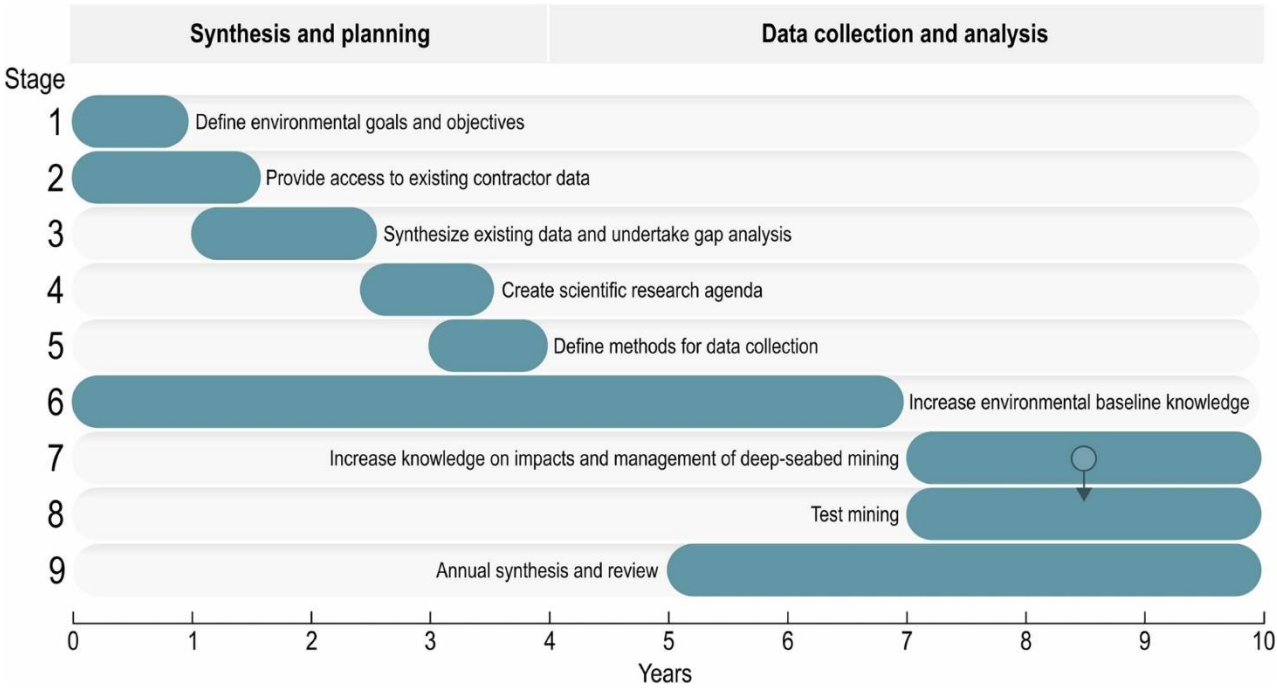
- Consensus scientifique
- La France soutient l'interdiction de toute exploitation des grands fonds marins (COP27)





Key Scientific Gaps			Habitat									
			Nodules			Active Sulfides		Inactive Sulfides		Cobalt-rich Ferromanganese Crusts		
Theme	Topic	Sub-Topic	1	2	3	4	5	4	5	6	7	
Environmental Baselines	Abiotic	High-resolution bathymetry										
		Oceanographic setting (e.g., currents, oxygen minimum zones, temperature, turbulence levels, sound, suspended particles)										
		Seabed properties (e.g., sediment characteristics, oxygen penetration, redox zonation, metal reactivity)										
		Natural disturbance regimes										
	Biotic*	Species taxonomy										
		Trophic relationships										
		Life histories (e.g., age of maturity, longevity, reproduction, fecundity)										
		Spatial variability										
		Temporal variability										
		Connectivity (e.g., dispersal mechanisms, species ranges, source/sink populations)										
Deep-Seabed Mining	Impacts	Removal of resources										
		Plumes										
		Contaminant release and toxicity										
		Noise, vibration and light										
		Cumulative impacts										
	Resilience											
	Management	Environmental goals and objectives										
		Survey and monitoring criteria										
		Effectiveness of mitigation strategies										

Etat des connaissances



Amon, D. J et al. (2022). Assessment of scientific gaps related to the effective environmental management of deep-seabed mining. *Marine Policy*, 138, 105006. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2022.105006>

Des ressources... à exploiter ?



L'avenir de la filière : sobriété et recyclage. De nombreux métaux vont connaître des conflits d'usage (avec les besoins du numérique par exemple). Il faudra donc les prioriser. La **minimisation des usages** et la **maximisation du recyclage** sont cruciales. Ce qui nécessite d'interroger les usages finaux des métaux vendus et leur pertinence dans une économie bas carbone et respectueuse du vivant.

https://www.carbon4finance.com/files/Publication_Carbon4_Finance_métaux_et_climat_version_publique.pdf

« [...] l'impensé du règlement européen sur les matériaux critiques reste la sobriété [...]. Pourtant, la parution du troisième volet du sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), en avril 2022, a mis en exergue la nécessité de la sobriété »

Hache Emmanuel, 2024. <https://doi.org/10.3917/futur.458.0005>



4

Actualités

The Metals Company, une entreprise canadienne, a annoncé le lancement de son projet d'exploitation minière en eaux profondes dans le Pacifique sud d'ici 2026.

GEO AVEC AFP | Publié le 27/08/2024 à 14h55

<https://www.geo.fr/environnement/lancement-prevu-pour-2026-du-projet-d-exploitation-mini-ere-en-profondeur-par-the-metals-company-dans-le-pacifique-sud-221878>

TMC faces financial challenges as it develops technology to harvest polymetallic nodules from the Pacific Ocean for use in electric vehicle batteries

<https://miningdigital.com/operations/the-metals-company-sweeping-sea-bed-for-battery-materials>

TMC Announces June 27, 2025 Submission Date for Subsidiary NORI’s ISA Application, and Expanded Company Strategy

by The Metals Company | Nov 12, 2024



© Martin Katz / Greenpeace



Source: The Metals Company

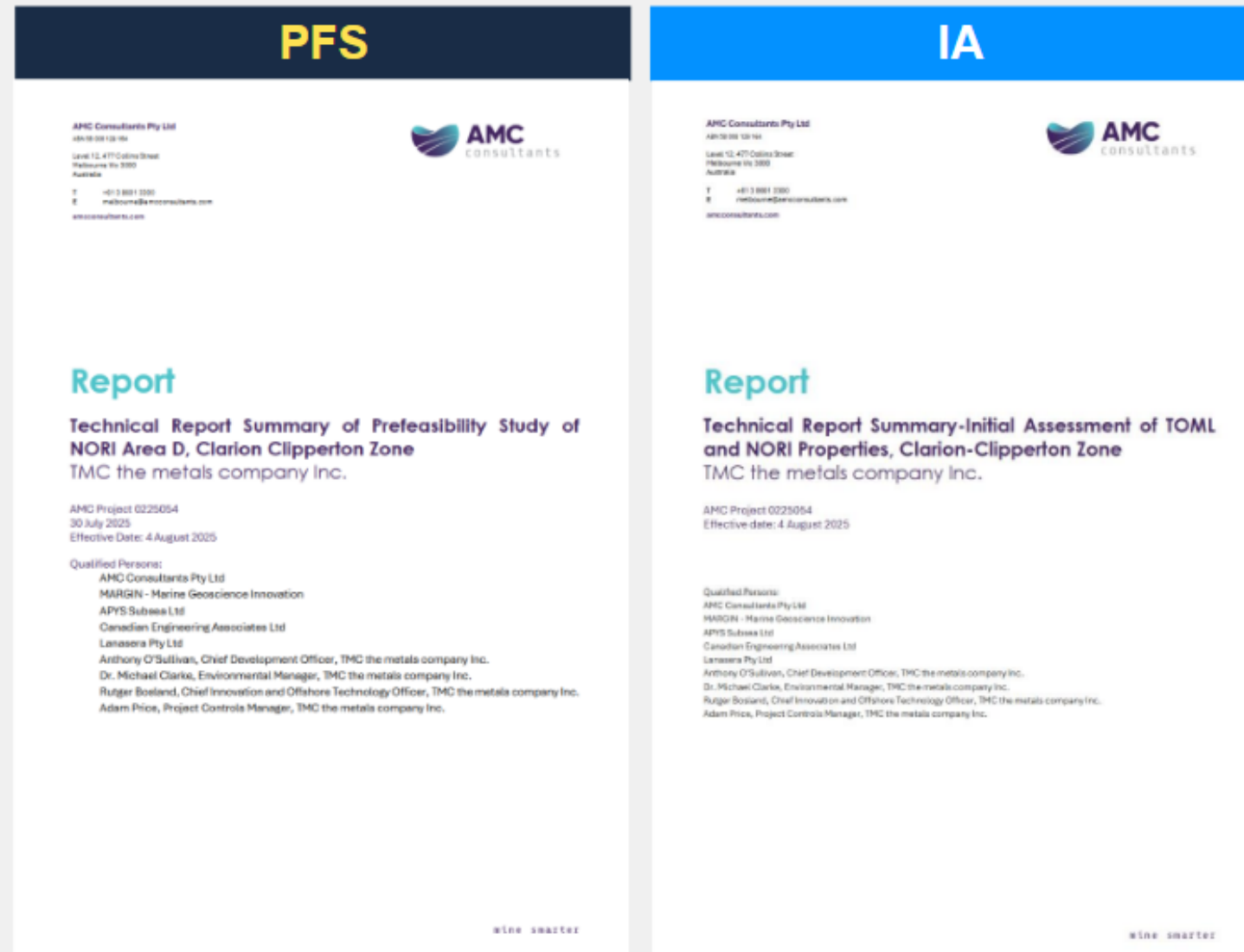


World First: TMC USA Submits Application for Commercial Recovery of Deep-Sea Minerals in the High Seas Under U.S. Seabed Mining Code

by The Metals Company | Apr 29, 2025



Two new economic studies published on August 4.



<https://investors.metals.co/static-files/f36f6850-3baa-4591-a902-dc3c884391e6>



Questions?