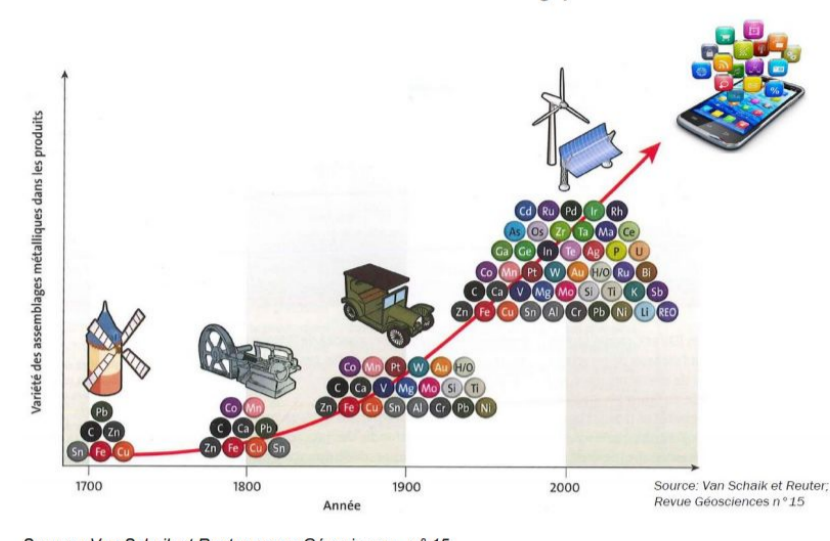


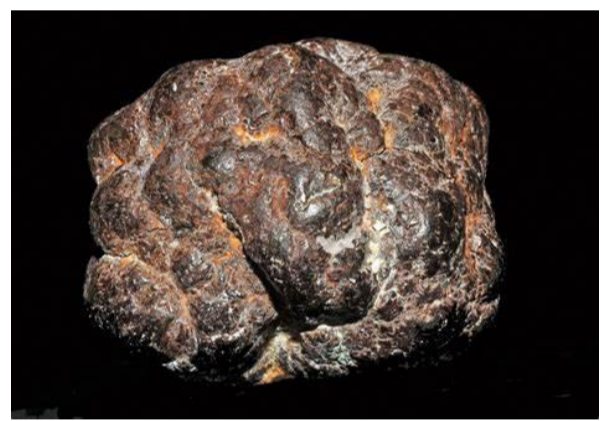
Pourquoi faire cette démarche?

- Les métaux occupent une place importante dans certains domaines (transport, énergie, bâtiment, nouvelles technologies)
- La consommation de métaux augmente chaque année, ce qui se traduit par une augmentation de la production, ce qui pose la question d'une éventuelle pénurie de métaux
 - Nécessité d'augmenter les ressources et réserves (ressources économiquement et énergétiquement exploitables)
- L'extraction des métaux a un coût énergétique qui augmente au fil du temps (10% énergie mondiale utilisée pour l'extraction de métaux)
 - L'extraction de métaux représentera 40% des dépenses énergétiques mondiales en 2030 [4], il faut trouver de nouvelles solutions pour pallier ce problème



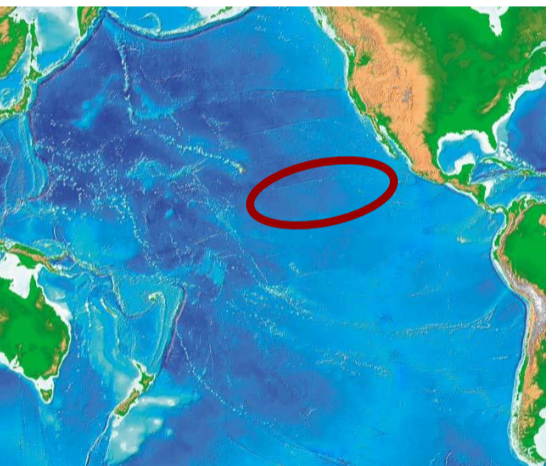
Ressources sous-marines: exemple des nodules polymétalliques

Des minerais riches en métaux



Éléments notables	Concentration [3]	Domaines d'application
Cobalt	0,5%	batteries électriques, aimants,...
Nickel	0,75%	alliages, accumulateurs, aimants,...
Cuivre	0,5%	conducteurs électriques, bobinages,...
Manganèse	17%	alliages (aciers au manganèse), ...

Et présents en grande quantité: exemple de la zone de Clarion Clipperton



- superficie: 9 millions de km²
- profondeur moyenne: 4500m
- dans les eaux internationales
- des ressources immenses...:
 - 78 Mt de cobalt, 11 fois les réserves connues!
 - 340 Mt de nickel, 4 fois les réserves connues!
- ...qui posent la question de la faisabilité technique et économique de leur exploitation

dont l'exploitation serait très encadrée:

- exploitation des fonds marins d'eaux internationales: requiert une autorisation spéciale de l'autorité internationale des fonds marins (ISA)
- l'ISA et l'industriel doivent signer un accord de taxation.
- normes environnementales strictes, imposant entre autres des études préalables de l'écosystème des fonds marins, donc de financer des opérations de reconnaissance de ces écosystèmes.

Estimation de la valeur des métaux contenus dans une tonne de nodules:

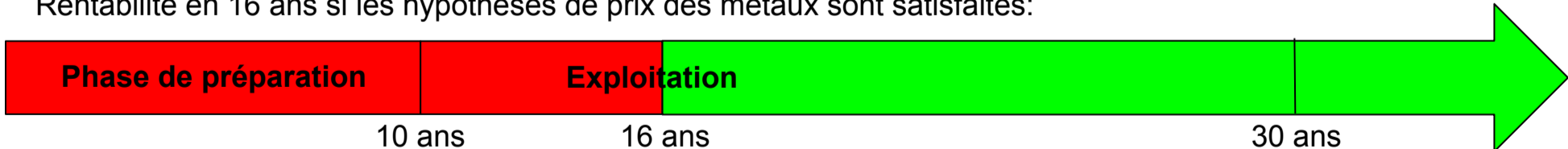
Métal	Prix actuel (\$/t) du métal pur	Prix projeté à long terme du métal pur (\$/t) [8]	Valeur contenue dans les nodules par tonne (\$/t)	Valeur contenue projetée à long terme par tonne (\$/t)
Cobalt	38 000	55 000	190	275
Nickel	10 800	24 000	81	185
Cuivre	5 600	7 000	28	35
total			299 \$/t	495 \$/t

Coûts estimés de récupération des nodules et d'extraction des métaux [8]

Opération dimensionnée pour récupérer et traiter 3 Mt/an de nodules secs. Ces étapes n'ont jamais été réalisées auparavant, ce qui explique des CAPEX importants liés au développement et à l'installation de technologies nouvelles.

Récupération des nodules		Extraction des métaux par pyrométallurgie	
CAPEX (\$)	OPEX (\$/t)	CAPEX (\$)	OPEX (\$/t)
1 841 millions	142	1 855 millions	139

- Rentabilité impossible avec les prix actuels des métaux
- Rentabilité en 16 ans si les hypothèses de prix des métaux sont satisfaites:



- Inenvisageable à l'heure actuelle, mais potentiellement exploitable si les prix des métaux augmentent.
- Même dans ce cas, demande un investissement conséquent et à long terme ...

Il est préférable de se concentrer sur d'autres solutions



Ressources spatiales: exemple des astéroïdes

Astéroïdes de type C

- Représentent environ 75% des astéroïdes
- Riches en carbone
- Présence d'eau, d'hydrogène ou d'hélium
- Peu intéressants pour des opérations minières

Astéroïdes de type S

- Représentent environ 17% des astéroïdes
- Riches en métaux, notamment en silice, mais aussi en fer, nickel et magnésium
- Peu intéressants, puisque le prix de ces métaux est très faible

Astéroïdes de type M

- Représentent environ 7% des astéroïdes
- Ils sont dits "métalliques" et peuvent contenir notamment du platine ou encore de l'or
- Ce sont eux qui sont le plus susceptibles d'avoir de hautes teneurs en métaux précieux

Grâce à leur grande taille, les astéroïdes de type M pourraient être des sources prometteuses: un astéroïde d'un kilomètre de diamètre pourrait contenir 3 milliards de tonnes de fer (trois fois la production mondiale de 2004). De plus, la teneur en métaux du groupe du platine serait d'environ 90 ppm, beaucoup plus élevée que sur Terre (environ 20 ppm).

Contraintes techniques

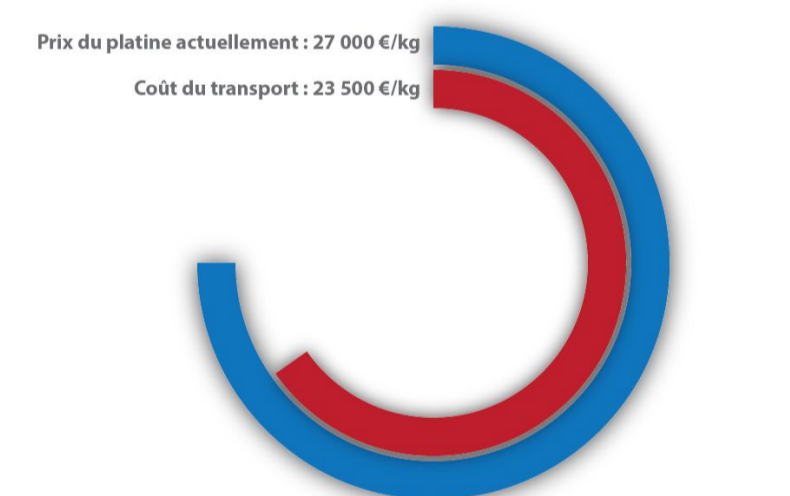
Comment extraire la matière première de l'astéroïde?

Comment enrichir la matière extraite pour obtenir un produit à forte valeur par tonne ?

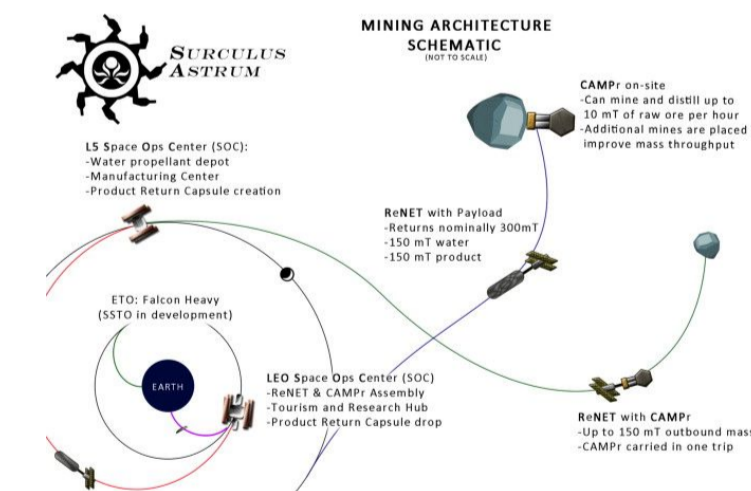
Problème du transport et de l'acheminement



Estimation du prix de l'opération et prix minimal du platine pour atteindre la rentabilité [5]



Coût du transport estimé comparé au prix du platine actuel [6]



Organisation du transport des minerais [1]

Au vu des coûts actuels de lancement, il faut optimiser le transport, et limiter le nombre d'engins quittant la Terre. Il faut donc miser sur:

- la réutilisation des fusées, dont la technologie est nouvelle
- la multiplicité des navettes pour améliorer le flux, et donc la quantité de matière ramenée
- une organisation avec des conteneurs en orbite basse autour de la Terre, des mines fixes sur les astéroïdes, et des navettes pour faire la jonction. Un tel système n'est pas réalisable aujourd'hui.

- En prenant uniquement en compte les coûts de transports, l'opération est à peine rentable: mais même en étant très optimiste sur les coûts d'extraction et d'enrichissement, elle ne l'est plus
- De plus, les techniques d'extraction et d'enrichissement ne sont pas bien développées
- L'exploitation d'astéroïde est donc inenvisageable aujourd'hui.

Élément	Concentration (ppm)	Masse dans l'océan (tonnes)	Réserve sur terre (tonnes)
Li	0,178	2,3 x 10 ¹¹	4,1 x 10 ⁶
U	0,0033	4,3 x 10 ⁹	~ 4 x 10 ⁹

Concentration et quantité de deux éléments intéressants dans l'océan [7]



[1] Andrews, Dana G., et al. "Defining a Successful Commercial Asteroid Mining Program." *Acta Astronautica*, vol. 108, Mar. 2015, pp. 106–18. [ScienceDirect,doi:10.1016/j.actaastro.2014.10.034](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.10.034).

[2] Hein, Andreas M., et al. "A Techno-Economic Analysis of Asteroid Mining." *Acta Astronautica*, vol. 168, Mar. 2020, pp. 104–15. [ScienceDirect,doi:10.1016/j.actaastro.2019.05.009](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.05.009).

[3] Les ressources minérales marines profondes, synthèse d'une étude prospective à l'horizon 2030. Ifremer, 2011.

[4] Dedryver, Liliane. *La consommation de métaux du numérique: un secteur loin d'être dématérialisé*. France Stratégie, 2020.

[5] Luis A. Barreda and Jean-Baptiste Rudelle. *Commodity Prices for Asteroid Mining serving Earth Market*. MINES ParisTech, Zenon Research Cent.

[6] Hogue, Michael D. *Regolith Derived Heat Shield for Planetary Body Entry and Descent System with In Situ Fabrication*. NASA, 13 novembre 2012

[7] Bardi, Ugo. « Extracting Minerals from Seawater: An Energy Analysis ». *Sustainability*, vol. 2, n° 4, avril 2010, p. 980-92. [DOI.org \(Crossref\),doi:10.3390/su2040980](https://doi.org/10.3390/su2040980).

[8] Kirchain, Randolph, et al. *Report to the International Seabed Authority on the Development of an Economic Model and System of Payments for the Exploitation of Polymetallic Nodules in the Area*. MIT, juin 2019.

