

RUÉE VERS LES MÉTAUX DES GRANDS FONDS

Réflexions sur l'exploitation minière en eaux profondes

Greenpeace est une organisation internationale qui agit selon les principes de non-violence pour protéger l'environnement et la biodiversité et promouvoir la paix. Elle est indépendante de tout pouvoir économique et politique et s'appuie sur un mouvement citoyen engagé pour construire un monde durable et équitable.

Étude réalisée pour le compte de Greenpeace e.V., Fribourg, février 2023.
Traduit de l'anglais (version originale) par Christelle Taureau pour Greenpeace France.

Auteurs

Andreas Manhart – *Oeko-Institut*
Ashleigh McLennan – *Oeko-Institut*

Contact

info@oeko.de
www.oeko.de

Siège à Fribourg

P. O. Box 17 71
79017 Fribourg

Merzhauser Straße 173
79100 Fribourg
Tel +49 761 45295-0

Bureaux Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Tel +49 30 405085-0

Bureaux Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Tel +49 6151 8191-0

Greenpeace France

13 rue d'Enghien 75010 Paris France
greenpeace.fr

Sommaire

Liste des abréviations	4
I - Informations générales et introduction	5
II - Potentiel des ressources	9
III - Projections de la demande	14
IV - Zoom sur les matières premières utilisées dans les batteries	18
V - Les impacts	22
Répercussions sur la biodiversité (fonds océaniques)	22
Répercussions sur la séquestration du carbone (plancher océanique)	25
Répercussions sur la biodiversité (colonne d'eau)	26
VI - Synthèse et aspects d'une stratégie alternative pour les matières premières	29
Repenser les schémas de transport	30
Développer un système mondial de reprise et de recyclage	31
Une vision plus holistique de l'économie circulaire	33
Réflexions sur l'exploitation minière	34
Références	35

Liste des abréviations

AIFM	Autorité internationale des fonds marins
BMS	Système de gestion de batterie (Battery Management System)
CNUDM	Convention des Nations unies sur le droit de la mer
LCO	Dioxyde de cobalt et de lithium (Lithium-cobalt-oxide)
LFP	Lithium fer phosphate
ODD	Objectif de développement durable
OTR	Oxydes de terres rares
UE	Union européenne
VE	Véhicule électrique
ZCC	Zone de Clarion-Clipperton

I - Informations générales et introduction

Le développement économique, la croissance démographique et les tentatives de décarboner les économies en remplaçant les technologies fondées sur les combustibles fossiles par des solutions vertes telles que le solaire et l'éolien stimulent de manière significative l'augmentation de la demande de certaines matières premières, notamment le cobalt, le lithium, le niobium, le tantale et les terres rares (Dolega et al. 2021). Les prix mondiaux de presque tous les minéraux ayant augmenté au cours des années qui ont précédé le printemps 2022, le prix de certains métaux comme le cobalt a été multiplié par plus de deux, passant de moins de 30 000 \$US/t début 2021 à environ 80 000 \$US/t au printemps 2022 (DERA 2022). Si des hausses du prix des matières premières ont déjà été enregistrées à maintes reprises par le passé, souvent attribuées à des pénuries temporaires d'approvisionnement, certains spécialistes estiment que la demande en minéraux et en métaux nécessaires aux technologies vertes va connaître une croissance durable, comparable à la ruée sur le pétrole et le gaz qui a duré des décennies (Paris et Atacama 2022 ; Blondel et Kleijn 2022). Par ailleurs, les récents événements liés à la pandémie de Covid-19 et à la guerre en Ukraine ont sapé la confiance dans les relations au sein des filières mondiales d'approvisionnement et ravivé la crainte de pénuries d'origine politique. En conséquence, les politiques sur les matières premières sont en passe d'être réajustées, ce qui entraînera selon toute vraisemblance l'intensification de la ruée vers les matières premières, et en particulier les métaux indispensables aux technologies vertes.

À l'heure actuelle, l'exploitation minière des minéraux de base se déroule presque exclusivement sur terre ; les activités dans les hauts-fonds marins sont marginales et généralement cantonnées à l'intérieur des eaux territoriales des pays¹. Néanmoins, les gisements en eaux profondes font l'objet de l'attention croissante des sociétés minières et des analystes en matières premières.

¹ L'exploitation minière en eaux peu profondes est notamment pratiquée autour de l'île de Bangka, en Indonésie, où l'on trouve du minerai d'étain.

Pour la plupart, ces gisements se situent au-delà de la limite des 200 milles marins², dans les eaux internationales où aucun pays ne détient de droit souverain pour l'exploitation minière. D'après la Convention des Nations unies sur le droit de la mer (CNUDM), les activités minières sont régies par l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM), basée à Kingston en Jamaïque, et mandatée « pour organiser, réglementer et contrôler toutes les activités liées aux minéraux dans la zone internationale des fonds marins dans l'intérêt de l'humanité dans son ensemble [...] et assurer la protection efficace du milieu marin contre les effets nocifs pouvant découler des activités liées aux grands fonds marins » (AIFM 2022). Jusqu'à présent, l'AIFM a accordé 31 contrats d'exploration liés à trois types de gisements différents : sept pour des sulfures polymétalliques, cinq pour du ferromanganèse riche en cobalt et 19 pour des nodules polymétalliques (AIFM 2022). Les concessions, accordées pour 15 ans, permettent aux concessionnaires d'explorer le potentiel des ressources, mais leur impose également de mener des recherches environnementales. À l'heure actuelle, l'AIFM n'a encore approuvé aucune activité d'exploitation minière à visée commerciale.

Parmi tous les gisements de minéraux en eaux profondes, les nodules polymétalliques sortent clairement du lot en termes de potentiel et d'intérêts économiques. Ces nodules, de la taille et de la forme de pommes de terre, sont formés à partir de la précipitation de métaux autour d'un noyau. Ils contiennent du manganèse, du nickel, du cuivre, du lithium, du molybdène, des terres rares et d'autres métaux (Kuhn et al. 2018). Outre leur contenu métallique, c'est l'endroit où ils se trouvent qui rend ces gisements intéressants pour l'exploitation minière : ces nodules sont posés sur les fonds océaniques ou dans les 10 premiers centimètres de la couche sédimentaire. Leur extraction ne nécessiterait donc pas de fracturer des roches ni d'excaver une épaisse couche de sédiments. À plusieurs milliers de mètres sous le niveau de la mer, cette accessibilité relative revêt une grande importance, faisant des nodules polymétalliques de loin le gisement minéral le plus attrayant aux yeux de ceux qui s'intéressent à l'extraction minière en eaux profondes.

On trouve des nodules polymétalliques dans tous les grands océans, mais en termes de potentiel des ressources, c'est la zone de *Clarion-Clipperton* (ZCC), dans le Pacifique central, qui retient le plus d'attention. Cette zone d'environ quatre millions de kilomètres carrés forme le plus grand gisement connu au monde de ces nodules. Sur les 19 licences d'exploration accordées pour les nodules polymétalliques, 17 se

² À 200 milles marins (370 km) de la côte la plus proche.

situent dans cette région (AIFM 2022). En termes de projections économiques, différents modèles laissent supposer que l'extraction des nodules polymétalliques pourrait se révéler viable, à condition que des économies d'échelle puissent être réalisées (\geq deux millions de tonnes de nodules par an) et que les prix mondiaux des métaux soient élevés. Les investissements nécessaires à la réalisation de tels projets se monteraient à environ 1,9 milliard de dollars US, sans compter les coûts annuels de fonctionnement de 0,5 milliard de dollars US sur 20 ans (Sharma 2018). Si aucun contrat d'exploitation n'a encore été attribué jusqu'à présent, l'AIFM a publié un Projet de règlement d'exploitation en 2019 (AIFM 2019).

En juin 2021, le gouvernement de Nauru a demandé à l'AIFM de finaliser son règlement sur l'exploitation minière en eaux profondes, ce qui, conformément aux règles de l'AIFM, doit se faire dans un délai de deux ans. Le gouvernement de Nauru soutient Nauru Ocean Resources Inc., une entreprise qui détient une licence émise par l'AIFM pour explorer plus de 74 830 km² dans la ZCC. Si l'AIFM n'accède pas à la requête de Nauru dans un délai de deux ans, l'État insulaire et son partenaire seront en droit de soumettre au conseil de l'AIFM une demande de licence régie par les règles en vigueur jusqu'à la finalisation du règlement (Lyons 2021). Nauru Ocean Resources Inc. est une filiale de l'entreprise canadienne The metals company, qui a passé des accords similaires avec les gouvernements des Tonga et de Kiribati, couvrant ainsi une surface d'exploration de 224 533 km² dans la CCZ. Si The metals company est encore une entreprise plutôt petite qui n'emploie que 31 personnes, elle a conclu des accords avec de grandes multinationales, y compris Maersk et Glencore (The metals company 2022).

Étant donné la demande croissante en matières premières, les préparatifs engagés par les entreprises privées ainsi que les craintes récentes concernant des pénuries de matières premières liées à des raisons politiques, l'exploitation minière en eaux profondes constitue un scénario de plus en plus plausible. D'autant que The metals company prévoit de lancer l'exploitation commerciale en 2024, avec pour objectif d'extraire 12,5 mt/an de nodules (The metals company 2022). Néanmoins, c'est à la communauté internationale, et notamment aux 168 parties de la CNUDM, que reviennent les décisions relatives à l'exploitation minière en eaux profondes et aux mesures de précautions environnementales.

L'objectif du présent rapport est de contribuer aux prises de décision dans ce domaine en mettant en lumière certains aspects concernant l'approvisionnement en matières premières et l'extraction minière en eaux profondes. Il n'a pas pour ambition de fournir une évaluation complète de tous les aspects environnementaux, économiques, sociaux et techniques sur la question, mais plutôt de s'intéresser à certaines thématiques et perspectives qui, jusqu'à présent, n'ont pas été suffisamment évoquées dans les débats au sujet de l'extraction minière en eaux profondes.

II - Potentiel des ressources

La composition chimique des nodules polymétalliques ainsi que l'extrapolation de leur abondance dans la ZCC tendent à indiquer que ces gisements contiennent des teneurs en métaux qui pourraient être supérieures à celles de certains gisements terrestres avérés. D'après certaines données (Kuhn et al. 2018), c'est le cas pour le manganèse, le nickel, le molybdène, le cobalt, l'yttrium, le tellure et le thallium, tandis que d'autres métaux tels que le vanadium, le lithium, le tungstène et le bismuth atteignent des concentrations du même ordre de grandeur que celles des réserves terrestres. Si de tels chiffres expliquent l'intérêt que suscitent les gisements de la ZCC, il convient toutefois de souligner qu'ils sont toujours quelque peu hypothétiques, si l'on se réfère aux définitions des termes « ressources » et « réserves ». D'après (ICMM 2019), ces termes sont définis comme suit :

« Une **ressource minérale** est une concentration ou une occurrence de substance solide présentant un intérêt économique dans ou sur la croûte terrestre dont la forme, la teneur (ou qualité) et la quantité sont telles qu'elles présentent des perspectives raisonnables d'extraction rentable à terme [...] »

« Une **réserve minérale** désigne la partie économiquement exploitable des ressources minérales mesurées et/ou indiquées [...] »

Ainsi, le terme de ressources inclut les gisements qui contiennent des concentrations en métaux significatives mais qui peuvent ne devenir intéressantes pour l'extraction que lorsque les technologies auront progressé et/ou que les prix des matières brutes seront suffisamment élevés pour stimuler les investissements dans l'extraction minière. De plus, les ressources ne tiennent pas compte du fait que certaines zones sont difficiles à exploiter (par ex. une zone souterraine accidentée), qu'elles présentent une densité de nodules disproportionnellement faible, ou qu'elles sont situées à des endroits où l'exploitation minière reste interdite par la loi³.

³ Plusieurs régions de la zone pacifique de Clarion-Clipperton sont classées « zones d'intérêt environnemental particulier » par l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM 2022). Aucune licence d'exploration n'est accordée pour ces zones, si bien que l'exploitation minière active dans ces régions est fortement improbable dans les décennies à venir.

Ces chiffres ne prennent pas non plus en considération le fait que tous les métaux ne peuvent pas être extraits à partir des nodules ramassés. Comme pour n'importe quel minerai, les processus de séparation des métaux du minerai se concentrent sur une sélection d'éléments, en général ceux présents à des concentrations élevées et présentant une valeur économique suffisante. Pour les nodules polymétalliques, l'extraction s'attachera donc essentiellement au cuivre, au nickel, au cobalt et au manganèse (Sen 2018 ; Zhao et al. 2020) et éventuellement au molybdène (Sommerfeld et al. 2018), tandis que bon nombre d'autres éléments seront considérés comme des résidus, boues résiduelles et autres sous-produits des processus appliqués. Suivant leur concentration et les coûts de récupération, ils pourront potentiellement être récupérés à partir de ces sous-produits. Toutefois, un grand nombre d'éléments traces seront vraisemblablement trop dilués pour être récupérés. Le lithium, par exemple, affiche des concentrations moyennes de 0,0131 % dans les nodules polymétalliques de la ZCC (Kuhn et al. 2018), ce qui est bien inférieur aux concentrations trouvées dans les mines de lithium terrestres, généralement comprises entre 0,48 % et 1,09 %⁴ (Mining Technology 2021).

Il faut aussi garder à l'esprit que les processus de transformation métallurgique ne sont pas parfaits. D'après la littérature disponible, le taux de récupération des principaux métaux pour les nodules polymétalliques se situerait entre plus de 90 % et 100 % pour le cuivre, le cobalt, le molybdène, le nickel et le manganèse (Sommerfeld et al. 2018). The metals company indique que, selon ses prévisions, ses propres taux de récupération seraient de 94,6 % pour le nickel, 86,2 % pour le cuivre, 77,2 % pour le cobalt et 98,9 % pour le manganèse (the metals company 2022).

Ainsi, les réserves constituent généralement des chiffres plus concrets, car elles désignent des quantités de matières brutes pouvant être exploitées et extraites dans les conditions techniques, économiques et légales actuelles. En la matière, il convient de noter qu'en l'état actuel des choses, aucun gisement en eaux profondes ne peut être exploité, non seulement faute de licences d'exploitation, mais aussi parce que les technologies d'extraction n'ont encore été testées qu'au stade de projets pilotes à petite échelle.

⁴ Ce qui équivaut respectivement à 1,04 % et 2,35 % de Li₂O.

Afin de réaliser une estimation réaliste des volumes de matières premières qui pourraient être extraits en eaux profondes, mieux vaut utiliser des modèles donnant une idée concrète de l'extraction minière et de la transformation des minerais. (Kuhn et al. 2018) et (The metals company 2022) ont réalisé ces modélisations et parviennent à des résultats assez similaires, présentés dans le Tableau 2-1. Ce dernier montre que les projets d'extraction minière en eaux profondes ne peuvent fournir que certains métaux, parmi lesquels seuls le cobalt, le manganèse et le nickel pourraient remporter des parts de marché intéressantes au niveau mondial. L'extraction du lithium et des oxydes de terres rares (y compris le néodyme) figure dans les données de (Kuhn et al. 2018), mais ces chiffres sont soumis à des incertitudes considérables. En effet, leurs concentrations sont faibles (voir ci-dessus) et les technologies de fusion et de raffinage sont axées sur d'autres matières premières. Dans ce contexte, le lithium et les terres rares sont typiquement considérés comme des sous-produits (résidus) car ils présentent des concentrations faibles qui ne conviennent pas à une récupération ultérieure.

Tableau 2-1 : Comparaison entre la production annuelle de métal et la production potentiellement issue de l'extraction minière en eaux profondes dans la zone de Clarion-Clipperton

	Production 2021	Estimation de la production de 5 projets d'extraction minière de nodules (total de 10 millions de tonnes de nodules secs par an)	Estimation de la production à grande échelle de « The metals company » et de ses filiales après 2030 (total de 9,5 millions de tonnes de nodules secs par an)	Estimation de la production de 5 projets d'extraction minière de nodules, en pourcentage de la production de 2021	Estimation de la production à grande échelle de « The metals company » et de ses filiales après 2030, en pourcentage de la production de 2021
	[1000 t/a]	[1000 t/a]	[1000 t/a]	[%]	[%]
	USGS 2022; Deetman et al. 2018 (for Nd)	Kuhn et al. 2018	“The metals company” 2022		
Aluminium	68 000	0	0	0 %	0 %
Chrome	41 000	0	0	0 %	0 %
Cobalt	170	17	10	10 %	6 %
Cuivre	21 000	118	93	0,6 %	0,4 %
Graphite	1 000	0	0	0 %	0 %
Indium	0,92	0	0	0 %	0 %
Fer	1 600 000	0	0	0 %	0 %
Plomb	4 300	0	0	0 %	0 %
Lithium	100	1,4	0	1 %	0 %
Manganèse	20 000	3 000	2 931	15 %	15 %
Molybdène	300	6	0	2 %	0 %
Néodyme	23 000	1,4	0	0,006 %	0 %
Nickel	2 700	139	126	5 %	5 %
Argent	24	0	0	0 %	0 %
Titane	9 000	0	0	0 %	0 %
Vanadium	110	0	0	0 %	0 %

Données utilisées pour la colonne 4

Collecte annuelle de nodules humides = 12,5 Mt

Teneur en humidité = 24 %

Abondance = 17,1 kg/m² (nodules humides)

Teneur en Ni = 1,4 %

Teneur en Cu = 1,14 %

Teneur en Co = 0,14 %

Teneur en Mn = 31,2 %

Rendement d'extraction de Ni = 94,6 %

Rendement d'extraction de Cu = 86,2 %

Rendement d'extraction de Co = 77,2 %

Rendement d'extraction de Mn = 98,9 %

Source : Calculs à partir de données provenant de (USGS 2022 ; Kuhn et al. 2018 ; the metals company 2022 ; Deetman et al. 2018)

Les points à retenir

- Les nodules polymétalliques, en particulier ceux de la zone de Clarion-Clipperton, constituent le gisement en eaux profondes suscitant le plus vif intérêt, tant du point de vue de l'approvisionnement en ressources que des perspectives économiques.
- Si le potentiel indiqué des ressources est très élevé et excède en partie les réserves terrestres, cela ne signifie pas que l'exploitation de tels volumes est réaliste. Même une fois les concessions d'exploitation accordées, les projets d'extraction minière ne peuvent générer qu'une fraction de ces potentiels.
- En outre, il est important de noter qu'un grand nombre de métaux traces contenus dans les nodules ne pourront vraisemblablement pas être extraits au cours du processus métallurgique. Ainsi, le potentiel des ressources pour tous les éléments autres que le cuivre, le cobalt, le molybdène, le nickel et le manganèse doit être considéré avec prudence.
- Les projets d'extraction minière en eaux profondes, dont l'exploitation à grande échelle ne pourrait de manière réaliste pas démarrer avant 2030, pourraient remporter des parts de marché substantielles pour le cobalt, le manganèse et le nickel, mais pas pour d'autres métaux.

III - Projections de la demande

Tous les analystes de marché anticipent une croissance de la demande en matières premières nécessaires aux technologies vertes, telles que le stockage de l'énergie (batteries), les éoliennes et les modules photovoltaïques. Figurant au centre de ces projections, le cobalt, le graphite et le lithium sont les seules matières premières dont, selon les calculs de la Banque mondiale, les besoins pour les technologies de l'énergie pourraient être environ quatre à cinq fois plus élevés en 2050 que la production annuelle actuelle (voir Tableau 3-1)⁵.

⁵ Nous avons conscience que l'estimation de la demande de la Banque mondiale est une projection possible parmi d'autres, fondée sur un ensemble spécifique de scénarios et d'hypothèses, et que plusieurs autres projections pertinentes ont été publiées récemment. Pour les besoins de cette étude, nous la citons à titre d'exemple.

Tableau 3-1 : Production de minéraux en 2021 et projection de la demande annuelle pour les énergies renouvelables en 2050

	Production 2021	Projection de la demande émanant des technologies de l'énergie pour 2050	Projection de la demande émanant des technologies de l'énergie en pourcentage de la production de 2021
	[1000 t/a]	[1000 t/a]	[%]
	USGS 2022	World Bank 2020	
Aluminium	68 000	5 583	8 %
Chrome	41 000	366	1 %
Cobalt	170	644	379 %
Cuivre	21 000	1 378	7 %
Graphite naturel	1 000	4 590	459 %
Indium	0,92	1,73	188 %
Fer	1 600 000	7 584	0,5 %
Plomb	4 300	781	18 %
Lithium	100	415	415 %
Manganèse	20 000	694	3 %
Molybdène	300	33	11 %
Néodyme*	45	8,4	19 %
Nickel	2 700	2 268	84 %
Argent	24	15	63 %
Titane	9 000	3,44	0,04 %
Vanadium	110	138	125 %

* Données pour le néodyme fondées sur les volumes de production des oxydes de terres rares et sur une teneur en Nd moyenne de 16 % (TMR Research 2022)

Source : Banque mondiale 2020 ; USGS 2022

S'il existe un large consensus concernant la tendance générale à la hausse de la demande, l'estimation de la demande en minerai émanant des technologies de l'énergie (y compris les transports) pour 2050 dépend largement des scénarios climatiques sur lesquels elle se fonde. Entrent en compte les scénarios de la demande globale pour les transports et l'énergie, la part future des différents modes de transport et solutions énergétiques au sein de cette demande, ainsi que les hypothèses de développement et d'innovation, entre autres facteurs. Merci de vous reporter aux différents scénarios et hypothèses sur lesquels s'appuient les chiffres présentés dans le tableau de la Banque mondiale (2020). Dans ce contexte, il est important de noter que les projections de la Banque mondiale présentées dans le Tableau 3-1 ne tiennent pas compte d'éventuelles évolutions au niveau des éléments chimiques secondaires entrant dans la composition des batteries Li-ion, mais tablent

sur le fait que les batteries Li-ion de 2050 conserveront la même composition qu'aujourd'hui. Eu égard à la rapidité et à la continuité des progrès dans ce domaine, cette hypothèse est hautement improbable, ce qui pointe du doigt des incertitudes largement répandues quant aux projections de la demande sur plusieurs décennies. En conséquence, les projections quantitatives présentent des écarts significatifs, allant de 150 000 t à 558 800 t en 2030 pour la demande annuelle mondiale en lithium⁶ (Schmidt 2022), avec des fourchettes similaires pour le cobalt (Giurco et al. 2019 ; Miller et al. 2021). Ces incertitudes sont particulièrement frappantes pour les matières premières utilisées dans une petite gamme d'applications. Ainsi, le rapport de la Banque mondiale dans lequel figure le Tableau 3-1 affirme également que le lithium, le graphite et le cobalt « ne sont nécessaires que pour une ou deux technologies et leur demande présente donc des incertitudes plus marquées, les ruptures et les déploiements technologiques pouvant avoir des répercussions importantes sur leur demande » (Banque mondiale 2020). C'est particulièrement vrai pour le cobalt : si 57 % de la production mondiale de cobalt sert aujourd'hui aux batteries Li-ion (Cobalt Institute 2022), ces dernières se déclinent en un certain nombre de sous-catégories affichant différents composants en cobalt, certaines n'en nécessitant pas du tout. Des évolutions au niveau des sous-catégories privilégiées et des compositions chimiques ont déjà entraîné une baisse de la demande en cobalt par unité de capacité de stockage sur batterie, et cette tendance devrait se poursuivre (Al Barazi 2018 ; Betz et al. 2021). D'après (Avicenne energy 2019), le prix des matériaux de cathode (cobalt ou produits de substitution tels que le nickel) représente environ un tiers des coûts de production des cellules de batteries Li-ion, ce qui signifie qu'une hausse des prix de ces matières premières stimulera probablement une réorientation en faveur de types de batteries contenant moins ou pas de cobalt, une tendance que l'on observe déjà sur différents segments (Willing 2020). L'approvisionnement en certains matériaux de substitution tels que le manganèse, le nickel, l'aluminium, le fer et le phosphate étant bien moins vulnérable, une hausse de la demande émanant du secteur des batteries n'aurait que des effets très limités sur les marchés mondiaux de ces matières premières⁷ (voir Tableau 3-1).

⁶ À partir de 82 000 t de production annuelle en 2020.

⁷ Dans l'UE, 87 % du manganèse total et 89 % du nickel total sont utilisés comme éléments d'alliage dans différents produits finis d'acier. 2 % seulement du manganèse total servent actuellement à la fabrication de cathodes pour les batteries et 11 % du nickel total à l'équipement électrique et électronique (dont seulement une partie pour les batteries). Quant au pourcentage d'aluminium utilisé dans les batteries, il est tellement faible qu'il ne figure même pas dans les statistiques commerciales (Commission européenne 2020b). Le Graphique 4-1 présente davantage de données sur la part mondiale des éléments utilisés dans les batteries Li-ion.

Les points à retenir

- Les énergies renouvelables, les véhicules électriques et d'autres technologies vertes vont stimuler la croissance de la demande en différents minerais et métaux. Selon les projections, les hausses les plus prononcées concerneront la demande en lithium, en cobalt et en graphite. Pour ces matériaux, cette croissance est presque exclusivement due à l'augmentation de la demande en batteries Li-ion destinées aux véhicules électriques et, dans une moindre mesure, au stockage stationnaire de l'énergie. Néanmoins, il est très difficile de prévoir dans quelle mesure ces demandes vont croître.
- D'autres matières premières, telles que le cuivre et le molybdène, verront probablement leur demande augmenter dans une bien moindre mesure, tirée par les technologies des énergies vertes.
- Les nodules polymétalliques présents en eaux profondes contiennent du cobalt et du lithium, mais pas de graphite.
- Il est possible que l'exploitation minière des nodules polymétalliques génère un approvisionnement supplémentaire significatif en cobalt. Par comparaison, l'apport supplémentaire en lithium est limité (voir Tableau 2-1). De plus, la faisabilité de l'extraction du lithium à partir de ces nodules polymétalliques n'a pas encore été avérée et ne figure pas parmi les objectifs des projets d'exploitation minière en eaux profondes planifiés (voir chapitre 2).
- Les projections concernant la demande en cobalt restent marquées par de grandes incertitudes. Si les batteries Li-ion constituent de loin le principal moteur de la demande croissante en cobalt, il existe différentes sous-compositions chimiques nécessitant peu voire pas du tout de cobalt.
- Il est possible que les prix croissants du cobalt entraînent l'abandon de cet élément au profit d'autres métaux tels que le nickel, le manganèse, le fer et le phosphate (un phénomène qui se dessine déjà aujourd'hui).

IV - Zoom sur les matières premières utilisées dans les batteries

La mobilité électrique et la dépendance aux batteries Li-ion pour alimenter les véhicules électriques sont au cœur de l'argumentaire en faveur de l'exploitation minière des nodules polymétalliques. L'entreprise d'exploitation minière en eaux profondes The metals company s'appuie sur des présentations laissant penser que l'exploitation des nodules polymétalliques permettra de soulager la pression qui pèse sur l'approvisionnement en métaux indispensables à la fabrication des batteries Li-ion et, par ricochet, sur la mobilité électrique (The metals company 2021). De fait, il semble en effet possible d'extraire des quantités intéressantes de cuivre, de manganèse, de cobalt et de nickel à partir des nodules polymétalliques (voir chapitre 3), et il est vrai que ces matériaux entrent dans la composition des batteries Li-ion. Néanmoins, dans les présentations qu'elle publie sur son site Internet et dans son rapport annuel (The metals company 2021, 2022), l'entreprise passe sous silence bon nombre d'autres faits concernant les matières premières des batteries :

- La fabrication des batteries Li-ion nécessite un éventail plus large de ressources que ce qu'il est possible d'extraire des nodules polymétalliques : le graphite et le lithium sont également des composantes essentielles des batteries, mais ils ne peuvent être extraits de ces nodules (voir aussi le chapitre 3).
- Sur l'ensemble des matières premières nécessaires à la fabrication des batteries Li-ion, seuls le graphite, le lithium et le cuivre sont réellement indispensables, car ils ne peuvent être remplacés par d'autres éléments sans que cela ait des conséquences graves⁸ (voir Graphique 4-1). Sur ces trois éléments, l'exploitation des nodules polymétalliques ne peut fournir que du cuivre. Or, la demande en cuivre pour les batteries Li-ion est relativement négligeable du point de vue du marché mondial, si bien qu'une demande

⁸ Le graphite peut être remplacé par du lithium, mais cela reviendrait à échanger une matière première indispensable par une autre.

croissante dans ce domaine n'aura qu'un impact marginal sur l'offre et la demande de cuivre au niveau mondial.

- À cet égard, le manganèse est très comparable au cuivre : les quantités nécessaires pour les batteries Li-ion sont (et resteront) minimales par rapport à d'autres applications. La plus grande part (de loin) de manganèse sert d'élément d'alliage pour la fabrication de l'acier.
- Le cobalt et le nickel sont tous deux d'importants matériaux de cathode pour différents types de batteries Li-ion, mais ils peuvent être remplacés par d'autres matériaux ou mélanges de matériaux. Si des substitutions de ce genre ont des répercussions sur les propriétés des batteries, on trouve des exemples de batteries Li-ion sans cobalt et sans nickel sur le marché de la grande consommation. C'est le cas par exemple des batteries LFP sans cobalt ni nickel, qui gagnent rapidement du terrain sur le marché de la mobilité électrique en Chine et commencent à être utilisées par des pionniers du marché tels que Tesla (Willing 2020). Les parts de marché des batteries LFP sont passées d'environ 5 % en 2019 à plus de 30 % en 2022 (Wunderlich-Pfeiffer 2022 ; Kane 2022), remplaçant déjà de nombreuses compositions chimiques de batteries utilisant le nickel et/ou le cobalt dans un laps de temps relativement restreint.
- La recherche en cours sur les compositions chimiques et l'optimisation des batteries ouvriront probablement davantage de possibilités de substitution dans le futur. Outre de nouvelles optimisations des batteries LFP, le développement des batteries sodium-ion apportera peut-être des solutions de recharge adaptées grâce aux usines pilotes installées en Chine (Wunderlich-Pfeiffer 2022).

Graphique 4-1 : Les matières premières nécessaires aux batteries Li-ion

	Graphite	Li Lithium	Cu Cuivre	Mn Manganèse	Co Cobalt	Ni Nickel
Peut être produit à partir des nodules polymétalliques	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Part actuelle de l'approvisionnement mondial utilisée dans les batteries Li-ion	7 %	29 %	0,01 %	0,2 %	57 %	5 %
Substituable	Yes	No*	No	Yes	Yes	Yes
Matériaux de substitution	Li	-	-	Co, Ni, Al, Fe, P	Ni, Fe, P, Mn	Co, Fe, P, Mn

Matières premières indispensables à la fabrication de batteries Li-ion
Matières premières substituables pour la fabrication de batteries Li-ion

Matières premières couramment utilisées dans d'autres secteurs

* Substituable seulement en adoptant des types de batteries autres que Li-ion ou Li-métal (par ex. batteries Na-ion).

Source de la part de l'approvisionnement mondial utilisée pour les batteries Li-ion :

Co : (Cobalt Institute 2022) Graphite, Mn, Ni : (DERA 2021) ; Li : (Ding et al. 2020) ; Cu : calculé à partir des données suivantes : production annuelle totale de batteries Li-ion : 2 millions t (hypothèse fondée sur (Jacoby 2019)) ; contenu en Cu des batteries : 12 % (DERA 2021), production totale annuelle de Cu : 24 millions t (DERA 2021).

Les points à retenir

- Les présentations de *The metals company* laissent penser que l'extraction minière des nodules polymétalliques constitue un moyen majeur de sécuriser l'approvisionnement en matières premières indispensables à la production de batteries destinées aux véhicules électriques. Ces présentations passent sous silence le fait que deux des matières premières des batteries Li-ion les plus sous tension (le lithium et le graphite) ne peuvent être obtenues à partir des nodules.
- Certaines des matières premières qui peuvent être extraites des nodules polymétalliques sont déjà produites en quantités gigantesques pour des applications de masse (cuivre, manganèse). Bien qu'il soit possible que la demande liée aux batteries Li-ion augmente de manière significative, cette demande supplémentaire n'aura que des conséquences très marginales sur les marchés mondiaux de ces métaux et n'entraînera pas de pénurie.
- Les autres matières premières des batteries pouvant être obtenues à partir de nodules polymétalliques (cobalt, nickel) sont substituables si l'on opte pour des batteries Li-ion présentant d'autres compositions chimiques, un phénomène que l'on observe déjà aujourd'hui. Si la plupart des substitutions auront des conséquences sur les spécificités et les propriétés des batteries, il est probable que les activités de recherche et développement en cours élargissent le spectre des possibilités de substitution dans le futur. Étant donné que l'extraction minière en eaux profondes ne sera pas en mesure de fournir des quantités suffisantes de matières premières avant 2030, il se peut que les choix qui se portent aujourd'hui sur le cobalt et le nickel ne soient pas en adéquation avec les réalités de demain.

V - Les impacts

L'exploitation minière des nodules polymétalliques se fait en plusieurs étapes. Dans un premier temps, les nodules devront être soulevés du fond océanique à l'aide d'engins de dragage autonomes qui ramassent les nodules ainsi que les sédiments qui les entourent, font le tri et rejettent 90 % de cette matière derrière eux. Ensuite, les nodules seront aspirés jusqu'au navire de transformation en surface par un système de remontée (« riser »). Puis il faudra séparer les nodules de l'eau et des sédiments résiduels, lesquels seront déversés depuis le navire et retomberont jusqu'en dessous de la zone photique (soit à plus de 200 m de profondeur). Enfin, les nodules seront transportés à terre pour y être transformés (The metals company 2021).

Chacune de ces étapes peut avoir des répercussions sur l'environnement, les plus directes se produisant sur les fonds océaniques (zone benthique). En raison de leur inaccessibilité et de leur éloignement de toute activité humaine, les grands fonds marins forment l'un des écosystèmes les mieux préservés de la planète (Smith et al. 2020). L'exploitation minière aurait pour conséquence de perturber cet écosystème sur plusieurs fronts.

Répercussions sur la biodiversité (fonds océaniques)

Certains éléments de preuve semblent indiquer que les nodules polymétalliques eux-mêmes constituent une partie importante de l'habitat des grands fonds. Ainsi, une étude (Vanreusel et al. 2016) a observé des densités plus importantes de faune sessile et mobile sur ou à proximité des nodules polymétalliques que dans les zones qui en sont dépourvues : tandis que les zones riches en nodules abritaient 14 à 30 individus sessiles et 4 à 15 individus mobiles par are (100 m²), les zones sans nodules ne comptaient que 8 individus sessiles et 1 à 3 individus mobiles par are. L'une des explications plausibles à cela est que les nodules fournissent un abri et une surface de croissance dans un environnement par ailleurs dépourvu de substrat dur. On a découvert certaines espèces d'éponges et de mollusques qui, jusqu'à présent, n'ont été observées qu'à la surface des nodules, ainsi que des nématodes et des larves de crustacés logés dans les fissures des nodules. Une fraction seulement des grands fonds marins a fait l'objet d'études scientifiques, ce qui signifie que d'autres biotes, qui n'ont pas encore été découverts, pourraient être touchés négativement et ce d'une manière que l'on ignore encore (Miller et al. 2018).

La création de panaches sédimentaires constitue une autre conséquence sur l'environnement benthique. Ces panaches sont susceptibles d'asphyxier les animaux des eaux profondes et/ou d'obstruer le délicat appareil qui leur sert à s'alimenter (Niner et al. 2018). D'après The metals company, plus de 90 % des sédiments ramassés avec les nodules seront triés à l'intérieur du collecteur et rejetés derrière celui-ci, pour se déposer « à une distance de quelques centaines de mètres » (The metals company 2021). Toutefois, le comportement exact des nuages de sédiments, y compris la distance qu'ils parcourent et le temps qu'ils resteront en suspension, n'est pas encore bien connu, car il dépend du volume rejeté, de la stratification verticale ainsi que des courants océaniques (Miller et al. 2018). Des modèles existants donnent à penser que certains panaches de sédiments pourraient mettre jusqu'à une année pour se déposer, et que leur dispersion pourrait se faire dans un rayon atteignant des dizaines de kilomètres autour du site d'extraction minière (UNEP FI 2022 ; Miller et al. 2018).

L'étendue de la surface de dispersion a toutefois été sujette à débat. Ainsi, (Gillard et al. 2019) déclare qu'il est possible de restreindre les retombées du nuage à une petite zone en construisant un engin collecteur et des tuyaux d'échappement conçus pour un rejet et une turbulence élevés ce qui, d'après leurs modélisations, augmente la vitesse de floculation des sédiments. Une autre étude menée par Spearman et al. (2020) avance que les études de modélisation devraient être axées sur la distance à laquelle la concentration du nuage est réduite par rapport à la concentration naturelle de l'environnement, plutôt que sur la distance parcourue par les sédiments dans la plaine abyssale. Cette hypothèse a été testée dans le contexte d'encroûtements riches en cobalt, mais les auteurs affirment que ces conclusions sont aussi valables pour l'extraction minière de nodules (Spearman et al. 2020).

Étant donné l'étendue de la surface nécessaire à l'extraction minière des nodules polymétalliques, il est aussi probable que la fragmentation de l'habitat ait des conséquences néfastes sur la faune de l'environnement benthique. Selon Smith et al (2020), la ZCC a été divisée en neuf sous-régions écologiques, chacune d'entre elles abritant, selon les estimations, des populations de grands fonds différentes. Une part substantielle de trois de ces sous-régions suscite un intérêt en termes d'extraction minière. Le ramassage des nodules dans ces zones pourrait engendrer un risque d'extinction du biote vivant sur ces nodules (Smith et al. 2020). En l'absence d'essais de grande envergure, l'impact sur la continuité des habitats est difficile à prévoir et

dépendra de l'échelle de l'extraction des ressources et de la dispersion des sédiments, potentiellement sur une très grande surface, qui en découle (Miller et al. 2018).

De plus, le bruit, la chaleur et la lumière dégagés par les véhicules d'extraction viendront potentiellement perturber le comportement des animaux. Dans la grande quiétude des eaux profondes, les espèces ont développé des systèmes acoustiques très sensibles, notamment des systèmes de communication à l'aide de très basses fréquences (<1,2 kHz) ou encore la capacité de détecter la chute de nourriture jusqu'à 100 m de distance. Le bruit anthropogénique constant généré par les véhicules sur le plancher océanique et les pompes hydrauliques va augmenter de manière significative le volume sonore ambiant, ce qui pourrait causer des altérations temporaires ou permanentes de l'audition chez certaines espèces (Miller et al. 2018). La luminosité est aussi très faible à ces profondeurs, ce à quoi les organismes se sont adaptés. De même, les températures y sont très stables, et on ignore les répercussions que la chaleur émise par le fonctionnement des machines et les déchets issus de l'extraction de l'eau résiduelle aura sur les organismes (Miller et al. 2018).

La lenteur avec laquelle l'environnement benthique se rétablit constitue un autre aspect dont il faut tenir compte pour évaluer les impacts de l'extraction en eaux profondes sur la perturbation et/ou la destruction des habitats. À ce jour, un certain nombre d'études ont indiqué qu'aucun rétablissement n'est à observer plusieurs décennies après le ramassage des nodules (Miller et al. 2018). Différentes études ont constaté des vitesses de récupération lentes ; l'une d'elles a notamment observé que, le long des traces laissées par les chaluts ou par les simulations d'exploitation minière expérimentales réalisées 37 ans auparavant, la recolonisation était extrêmement lente, avec très peu d'espèces présentes plusieurs dizaines d'années après les perturbations (Vanreusel et al. 2016). Selon une autre étude, il existe une différence de 79 % dans les rythmes respiratoires des suspensivores et des animaux filtreurs entre les zones perturbées et les zones non perturbées 26 ans après le labour des fonds marins (Stratmann et al. 2018).

Enfin, d'après les prévisions, le dérèglement climatique va encore ralentir ce processus de récupération. Au cours des 50 dernières années, la partie océanique située à plus de 200 m de profondeur s'est déjà réchauffée et acidifiée. Ces changements entraînent la diminution de la quantité de nourriture qui atteint les grands fonds marins. La hausse des températures des océans augmentera aussi le taux de métabolisme et les besoins énergétiques de la faune des grands fonds, ce qui

durcira la concurrence pour la nourriture en limitant celle-ci, et accroîtra les besoins en oxygène. Les températures pourront même dépasser le seuil de tolérance de nombreuses espèces (Levin et al. 2020).

Pour conclure, de nombreuses études estiment qu'il est difficile de prévoir l'ampleur réelle de l'impact sur la biomasse et la biodiversité des grands fonds, étant donné les lacunes dans les connaissances fondamentales. Les données biologiques de base concernant la plupart des animaux des grands fonds sont inexistantes, notamment leur vitesse de croissance, leur historique et leur tolérance aux facteurs de stress (tant aigu que chronique) (Smith et al. 2020 ; Washburn et al. 2019). En outre, les connexions entre les habitats du plancher océanique et l'écosystème de l'océan de manière plus large sont mal connues (Miller et al. 2021).

Répercussions sur la séquestration du carbone (plancher océanique)

L'impact des activités minières sur la séquestration du carbone dans le plancher océanique constitue une autre inconnue. Les organismes des grands fonds jouent un rôle dans la régulation du climat en piégeant le carbone et en produisant de l'oxygène grâce au phytoplancton qui recycle les éléments nutritifs (Niner et al. 2018). Les sédiments des régions abyssales et des bassins océaniques représentent 78 % des stocks mondiaux de carbone piégé dans les sédiments marins. Seuls 2 % de ces derniers sont situés dans des zones fortement ou totalement protégées, ce qui rend ces stocks vulnérables au développement des activités sur le plancher océanique, notamment l'extraction minière (Atwood et al. 2020). Lorsqu'il est déstabilisé, le carbone contenu dans les sédiments du plancher océanique peut se reminéraliser en CO₂, un processus susceptible d'exacerber les futurs dérèglements climatiques (Atwood et al. 2020). D'autres études estiment à l'inverse que les répercussions seraient limitées, les sédiments des grands fonds contenant des quantités infimes de matière organique hautement transformée dont la reminéralisation est peu probable, ce qui signifie que, même après une perturbation, une grande partie se redéposerait sur le plancher océanique (Orcutt et al. 2020). En l'état actuel des choses, il est donc difficile de savoir si l'exploitation minière en eaux profondes aura un impact significatif sur le cycle mondial du carbone (Levin et al. 2020).

Répercussions sur la biodiversité (colonne d'eau)

Au-delà du plancher océanique, d'autres répercussions peuvent découler du transport des nodules jusqu'à la surface, puis jusqu'à la terre ferme. Dans un premier temps, après que les nodules ont été remontés jusqu'au navire de transformation en surface (générant probablement du bruit tout le long de la colonne d'eau), l'eau et les sédiments résiduels sont séparés des nodules et les résidus sont rejetés dans la colonne d'eau, disséminant des sédiments et des métaux dissous sur de larges surfaces. À titre d'exemple, au cours d'une opération d'exploitation minière de nodules métalliques, on estime que 50 000 m³ de sédiments, de particules minérales et d'eau de mer seront rejetés chaque jour (soit environ 8 kg de solides par mètre cube). Les particules de sédiments et de métaux pourraient rester en suspension pendant plusieurs années et être entraînées sur des centaines de kilomètres, faisant peser des risques sur l'environnement de la zone mésopélagique (Drazen et al. 2020).

De nombreux suspensivores (des créatures qui se nourrissent de petites particules qu'ils filtrent dans l'eau) vivent dans la zone mésopélagique, formant une part importante de la chaîne alimentaire océanique. Des sédiments non organiques pourraient obstruer l'appareil qui leur sert à s'alimenter, tandis que le rejet de métaux et de toxines risque de contaminer la chaîne alimentaire en s'y accumulant. Bien que les niveaux seuils soient inconnus, la zone mésopélagique profonde présente des concentrations très faibles de sédiments en suspension, ce qui laisse supposer que la sensibilité de la faune aux sédiments est probablement élevée. De plus, les panaches de sédiments, en opacifiant l'eau, auront des répercussions négatives sur les comportements de chasse et de reproduction des animaux des profondeurs moyennes, tandis que le bruit provoquera du stress et interrompra leurs activités. Tout comme pour l'environnement des grands fonds, les données de référence écologiques permettant d'évaluer les répercussions réelles des activités d'extraction minière sur l'environnement mésopélagique sont inexistantes (Drazen et al. 2020).

Enfin, suite à la phase initiale de pré-transformation et d'extraction de l'eau sur le navire minier en surface, le matériau extrait sera probablement transporté par bateau jusqu'à la terre ferme. À cette étape, on peut tabler sur tous les impacts environnementaux habituels associés au transport maritime, notamment pollution marine, émissions atmosphériques et pollution sonore sous-marine. En outre, des déversements accidentels de minerais dans les eaux de surface peuvent se produire lors de leur transfert entre le navire minier et le bateau de transport (UNEP FI 2022).

Une fois sur la terre ferme, les minéraux devront subir les mêmes processus que ceux issus de gisements terrestres, à savoir le broyage et l'extraction chimique des éléments. Comme pour d'autres activités d'exploration en mer, des installations côtières seront peut-être nécessaires, ce qui pourra avoir des conséquences sur l'environnement côtier (UNEP FI 2022).

Les points à retenir

- L'extraction minière de nodules polymétalliques perturbera le plancher océanique et aura des effets néfastes sur la biodiversité et la biomasse de l'environnement benthique. Parmi les facteurs négatifs, citons la destruction de l'habitat que procurent les nodules ainsi que la création de panaches de sédiments et la génération de bruit. La fragmentation des habitats et la lenteur de la récupération constituent d'autres facteurs critiques.
- Le plancher océanique est un important puits de carbone. Il existe un risque que l'extraction minière en eaux profondes ait des répercussions négatives sur les services de séquestration du carbone fournis par cet écosystème. Toutefois, sur la base des éléments de preuve disponibles aujourd'hui, il est difficile d'évaluer dans quelle mesure le cycle mondial du carbone sera impacté.
- Le rejet de résidus miniers dans la colonne d'eau est susceptible de perturber la chaîne alimentaire. Des particules sédimentaires peuvent obstruer le mécanisme permettant aux animaux suspensivores de s'alimenter tandis que les métaux et toxines peuvent s'accumuler biologiquement tout au long de la chaîne alimentaire. En outre, il est probable que la présence de sédiments et de bruit ait des répercussions sur la chasse et l'accouplement des espèces marines.
- Les minerais extraits doivent être transportés par bateau pour être transformés dans des installations à terre. Le transport maritime est source de pollution marine, d'émissions atmosphériques et de pollution sonore sous-marine. Par ailleurs, il est fort probable que

l'extraction physique et chimique des minéraux à partir des minerais des fonds marins ait les mêmes impacts que la transformation des minerais provenant de gisements terrestres.

- Les eaux profondes constituent un environnement encore peu étudié. On en sait peu sur la biomasse et la biodiversité des grands fonds, si bien qu'il est difficile de prévoir l'impact qu'y aurait l'extraction minière. De plus, de nombreuses incertitudes demeurent quant à la taille de la surface qui serait touchée par les panaches de sédiments, aux répercussions sur le cycle mondial du carbone et aux éventuelles conséquences sur la chaîne alimentaire océanique.

VI - Synthèse et aspects d'une stratégie alternative pour les matières premières

Comme on l'a vu dans les chapitres 2 à 4, le potentiel de l'extraction minière des nodules en eaux profondes pour la sécurisation de l'approvisionnement de la transition énergétique en matières premières se révèle bien moins intéressant que ce qui est souvent avancé. Les nodules polymétalliques présents dans les eaux profondes fournissent seulement quatre ou cinq éléments (manganèse, cuivre, cobalt, nickel et éventuellement molybdène), dont seuls trois pourraient être extraits dans des quantités intéressantes pour le marché mondial (manganèse, cobalt, nickel). L'affirmation, clamée haut et fort, selon laquelle les nodules sont à même de sécuriser l'approvisionnement en matières premières pour la production future des batteries lithium-ion est trompeuse à plusieurs égards :

- Les nodules ne fournissent ni lithium ni graphite, les deux matériaux entrant dans la composition des batteries dont l'approvisionnement est le plus vulnérable.
- Deux des matières premières récupérées (cuivre et manganèse) sont essentiellement utilisées pour d'autres applications. Les batteries Li-ion représentant moins de 1 % de la consommation mondiale, une hausse de la demande en batteries Li-ion n'aura quasiment pas d'impact sur l'offre et la demande mondiales et ne nécessitera donc pas un élargissement significatif de l'exploitation minière.
- Si le cobalt et le nickel entrent aujourd'hui dans la composition de nombreuses batteries Li-ion, ils peuvent tous deux être remplacés par d'autres matériaux dont l'approvisionnement est moins sous tension. En effet, la quantité moyenne de cobalt dans les batteries Li-ion a déjà été réduite au cours des dernières années afin de limiter les coûts de fabrication et on trouve sur le marché des batteries Li-ion entièrement dépourvues de cobalt et de nickel.

- La recherche et développement va très certainement élargir la gamme des sous-catégories de batteries Li-ion adaptées et permettre davantage de solutions de substitution dans le futur.

Au vu de ces différents éléments, on peut affirmer avec certitude qu'une décision défavorable à l'exploitation minière en eaux profondes ne sonnera pas le glas de la production mondiale des batteries Li-ion ni des projets en faveur des technologies d'énergies vertes qui en dépendent. Étant donné la multitude de répercussions possibles et encore mal comprises de l'exploitation minière en eaux profondes, ainsi que les vastes surfaces de plancher océanique qu'il faudrait convertir pour une production relativement faible de matières premières, il est primordial d'appliquer le principe de précaution et d'abandonner tout projet d'exploitation. En lieu et place, il est recommandé de mettre davantage l'accent sur d'autres stratégies pour un approvisionnement durable et sur le recours à des ressources naturelles. Cette partie a pour objectif de mettre en lumière les pierres angulaires de ces stratégies qui, selon toute vraisemblance, auront des effets bien plus positifs sur l'offre et la demande en matières premières.

Repenser les schémas de transport

Bon nombre de prévisions concernant la demande mondiale en batteries se fondent sur les projections du passage des véhicules traditionnels aux véhicules électriques. Elles partent donc du principe que, dans les décennies à venir, les transports conserveront le schéma actuel fondé sur des voitures individuelles privées, avec un taux de croissance annuel continu. Or, le secteur des transports tout comme les urbanistes savent bien que ces chiffres ainsi que les taux de croissance actuels ne sont pas soutenables, non seulement du point de vue des ressources, mais aussi en raison de la situation dans les agglomérations urbaines. La densité du trafic et les heures passées dans les embouteillages constituent déjà un facteur majeur qui limite le potentiel de développement des villes et des pays. La situation est encore pire dans les mégalo-poles des pays à revenu faible et intermédiaire, comme à Lagos (Nigéria) ou à Mexico (Mexique) où les habitants passent souvent plusieurs heures par jour dans les bouchons entre leur domicile et leur travail (Obi 2018 ; Mexico News 2017). L'état du trafic routier ne se contente pas de limiter la capacité des habitants à se déplacer et à échanger des biens mais constitue aussi une perte considérable en termes de productivité et de qualité de vie. Il est donc grand temps de penser au-delà du simple remplacement des véhicules classiques par des voitures électriques de la même taille et au design similaire. Il faut maintenant réfléchir à des

solutions de mobilité des biens et des personnes qui soient plus efficaces, prennent moins de place, émettent moins de gaz à effet de serre et ne nuisent pas à la qualité de vie et au développement économique des habitants. Étant donné que plus de 55 % de la population mondiale vit en ville (UN-DESA 2018), la mise en place de systèmes de mobilité urbaine efficaces et intégrés est plus que jamais indispensable. Ces systèmes permettraient de ralentir la demande en voitures individuelles privées et, par ricochet, en batteries pour véhicules électriques.

Développer un système mondial de reprise et de recyclage

Les batteries Li-ion hors d'usage peuvent être recyclées. Bien que les processus de recyclage soient encore en phase de développement et en passe d'être optimisés, il est d'ores et déjà possible de récupérer différentes matières premières intégrées dans les batteries avec une grande efficacité (>95 %). C'est le cas pour le cuivre, le cobalt et le nickel. Des travaux sont en cours pour améliorer la récupération du lithium et du graphite. À l'heure actuelle, le développement des processus et des infrastructures de recyclage se concentre dans quelques pays d'Asie, d'Europe et d'Amérique du Nord (Chine, Corée du Sud, Japon, Belgique, Finlande, France, Allemagne et États-Unis notamment) (Sojka et al. 2020). La plupart des autres pays et régions du monde ne disposent pas d'infrastructures de recyclage des batteries Li-ion, ce qui signifie qu'il faudrait les acheminer par bateau jusqu'à des structures existantes dans un autre pays ou une autre partie du monde. En la matière, deux aspects doivent être pris en compte :

- L'acheminement des batteries représente des efforts et des coûts considérables. En effet, les batteries étant généralement considérées comme des déchets dangereux, tout mouvement transfrontière doit respecter la procédure de consentement préalable en connaissance de cause de la Convention de Bâle. Ce processus s'accompagne souvent d'une importante charge administrative et d'éventuels retards (PREVENT Waste Alliance & StEP 2022). En outre, des mesures de précaution contre l'incendie sont nécessaires et les batteries doivent être transportées dans des containers spéciaux remplis de sable, de vermiculite ou d'un matériau similaire, ajoutant encore aux coûts et aux efforts à déployer.
- Les processus de recyclage sont coûteux, si bien que les recycleurs ne peuvent offrir une compensation financière pour tous les types de batteries Li-ion. Ces dernières années, le recyclage tel qu'il était pratiqué par les entreprises européennes ne dégagait des bénéfices nets que pour les batteries à forte

teneur en cobalt (batteries LCO), tandis que les fournisseurs d'autres types de batteries Li-ion devaient payer des frais de prise en charge (Manhart et al. 2022). Le prix élevé des matières premières sur les marchés mondiaux pourrait temporairement changer la donne, mais les risques et les incertitudes économiques sont encore grands.

La collecte, l'emballage et l'exportation des batteries Li-ion en fin de vie ne présentent donc pas d'intérêt d'un point de vue économique dans la plupart des régions du monde, la gestion sûre des produits hors d'usage étant généralement génératrice de coûts nets (Manhart et al. 2022). La collecte et la gestion sûre (recyclage compris) ne peuvent se faire efficacement qu'avec le soutien de politiques nationales et internationales désignant clairement les responsabilités et fixant des objectifs en matière de reprise et de recyclage. Dans l'UE, ces objectifs sont définis dans la « Directive Batterie » (Directive 2006/66/CE), laquelle sera prochainement remplacée par un règlement « Batterie » plus complet qui imposera des objectifs contraignants aux fabricants de batteries en matière de collecte et de recyclage. Dans une grande partie de l'Afrique, de l'Asie et de l'Amérique latine, ce type de système est encore inexistant ou pas encore entièrement développé, de sorte que la collecte et le recyclage des batteries n'en sont encore qu'à leurs balbutiements. Ainsi, dans les pays à revenu faible et intermédiaire, la majeure partie des batteries Li-ion usagées sont généralement jetées avec les autres déchets municipaux solides, ce qui augmente les problèmes de pollution et les risques d'incendie.

Il y a 6,74 milliards de téléphones mobiles en circulation dans les pays à revenu faible et intermédiaire (Banque mondiale 2022). Pour des téléphones ayant une durée de vie moyenne de deux ans, utilisant des batteries LCO⁹ et avec des taux de collecte et de recyclage de 20 %¹⁰, le faible taux de collecte et de recyclage entraîne la perte de plus de 16 000 tonnes de cobalt par an. Cela correspond à environ 10 % de la production annuelle mondiale de cobalt et dépasse la production à capacité maximale prévue par *The metals company* après 2030 (voir Tableau 2-1). Si ces estimations sont soumises à certaines incertitudes, elles ne tiennent pas compte du

⁹ Les téléphones portables sont souvent équipés de batteries au dioxyde de cobalt et de lithium (LCO) contenant jusqu'à 25 % de cobalt. Cette estimation se fonde sur un poids moyen de la batterie de 39 g avec 13,8 % de cobalt (Manhart et al. 2016).

¹⁰ La collecte et le recyclage des batteries LCO (le type de batterie Li-ion qui a le plus de valeur) ont lieu dans une certaine mesure, mais ces processus sont souvent inférieurs aux normes et passent sous le radar des organismes de réglementation (Manhart et al. 2022). Par ailleurs, des taux de collecte de 20 % sont effectivement atteints dans certains pays à revenu intermédiaire dont la réglementation est en cours d'élaboration et d'application (Hilbert et al. à paraître).

potentiel de recyclage que présentent d'autres utilisations des batteries, par exemple les notebooks, tablettes et trottinettes électriques.

S'il est clair que, au cours de la prochaine décennie vouée aux changements technologiques, le recyclage seul ne sera pas en mesure de fournir tous les métaux en quantités suffisantes, il est tout aussi évident que des potentiels substantiels existent et sont loin d'être entièrement exploités. Dans de nombreuses régions du monde, des interventions ciblées sont nécessaires pour favoriser le recyclage des batteries Li-ion, particulièrement sous-exploité.

Une vision plus holistique de l'économie circulaire

La demande en matières premières, y compris celles entrant dans la composition des batteries Li-ion, est aussi influencée par la manière dont nous concevons et utilisons les produits. Des produits de mauvaise qualité à la durée de vie courte sont encore vendus à grande échelle partout dans le monde, car ils constituent à première vue un choix bon marché pour les consommateurs. Or, des produits à la durée de vie limitée sont l'un des principaux facteurs de la surconsommation des ressources. La plupart d'entre eux sont en définitive plus chers, si l'on tient compte des coûts engendrés par l'achat de produits de remplacement.

Mettre en place une norme minimum pour la durabilité et la réparabilité peut donc avoir un effet significatif sur la consommation totale des ressources. Dans le cas des batteries Li-ion, l'UE envisage d'intégrer des exigences de performance et de durabilité par l'intermédiaire de son nouveau « règlement Batterie » (Commission européenne 2020a). Au-delà de ces aspects, d'autres éléments de l'économie circulaire peuvent, dans leur ensemble, exercer un levier significatif sur la réduction des ressources utilisées et leur préservation :

- encourager le partage des produits ;
- augmenter le contenu recyclé des produits ;
- favoriser la réutilisation et la reconversion.

Ce dernier point présente un potentiel particulièrement intéressant pour réduire la demande globale en matières premières pour les batteries : un grand nombre de batteries usagées (par ex. provenant des véhicules électriques) affichent encore des caractéristiques et des qualités adaptées à une seconde vie pour d'autres applications, telles que le stockage stationnaire d'énergie. Si la reconversion des batteries a beaucoup fait l'objet de discussions, le recours à ce concept dépend

encore du soutien politique, notamment pour une définition claire des responsabilités en cas de défaillance des batteries ou d'accident. Il convient en outre de noter que l'accès au système de gestion de batterie (BMS) est une condition préalable importante pour identifier l'état de santé des batteries pour VE usagées et de leurs modules. Un accès universel au BMS pourrait donc considérablement faciliter la reconversion des batteries, mais l'état actuel de la technique ne le permet pas encore.

Réflexions sur l'exploitation minière

Une population mondiale en pleine croissance qui cherche à atteindre les Objectifs de développement durable, notamment l'élimination de la pauvreté (ODD 1), l'accès universel à une énergie propre (ODD 7) et la croissance économique (ODD 8), restera fortement dépendante des matières premières. Des villes et communautés durables (ODD 11) et une consommation et une production responsables (ODD 12) peuvent certes contribuer à faire baisser la demande en matières premières, comme on l'a mentionné dans les chapitres précédents. Mais en dépit de tous les efforts déployés pour accélérer l'économie circulaire, le monde continuera, à court et moyen termes, à dépendre des matières premières provenant de l'exploitation minière. Par ailleurs, s'il existe de nombreuses raisons d'éviter l'exploitation minière en eaux profondes, il convient aussi d'atténuer correctement les répercussions environnementales et sociales négatives de l'exploitation minière terrestre.

Références

AIFM (2019): Projet de règlement relatif à l'exploitation des ressources minérales dans la Zone. ISBA/25/C/WP.1. Kingston.

https://isa.org.jm/files/files/documents/isba_25_c_wp1-f_0.pdf, dernier accès : 13/7/2022.

AIFM (2022): Autorité internationale des fonds marins. <https://isa.org.jm/>, dernier accès : 8/7/2022.

Al Barazi, S. (2018): zur Verfügbarkeit von Kobalt für den Industriestandort Deutschland. Edited by Deutsche Rohstoffagentur (DERA).

https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/vortrag-kobalt-albarazi.pdf;jsessionid=C4D0211702D031C4DC855F2CD740E1CC.2_cid284?_blob=publicationFile&v=3, dernier accès : 13/7/2022.

Atwood, Trisha B.; Witt, Andrew; Mayorga, Juan; Hammill, Edd; Sala, Enric (2020): Global Patterns in Marine Sediment Carbon Stocks. In *Front. Mar. Sci.* 7, Article 165. DOI: 10.3389/fmars.2020.00165.

Avicenne energy (2019): The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2018-2030.

https://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2019/02/Keynote_2_AVICENNE_Christophe-Pillot.pdf , dernier accès : 13/7/2022.

Banque mondiale (2020): Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition.

Banque mondiale (2022): World Bank Development Indicators. Available online at <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=world-development-indicators>, dernier accès : 4/10/2022.

Betz, J.; Degreif, S.; Dolega, P. (2021): State of Play and Roadmap Concept: Mobility Sector. Re-Sourcing Deliverable 4.2.

https://re-sourcing.eu/static/5b2eb582e0bd432e53da92bccc290a75/sop_mobility_sector.pdf, dernier accès : 21/10/2022.

Blondel, E.; Kleijn, R. (2022): Critical materials, green energy and geopolitics: A complex mix. Edited by Leiden-Delft-Erasmus Centre for Sustainability Circular Industries Hub.

https://www.leiden-delft-erasmus.nl/uploads/default/attachments/Critical%20Materials_LDE%20White%20Paper_DEF20220627.pdf, dernier accès : 8/7/2022.

Cobalt Institute (2022): About cobalt.

<https://www.cobaltinstitute.org/about-cobalt/cobalt-life-cycle/cobalt-use/>, dernier accès : 13/7/2022.

Commission européenne (2020b): Study on the EU's list of Critical Raw Materials - Final Report (2020).

<https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42883/attachments/1/translations/en/renderitions/native>, dernier accès : 25/7/2022

Deetmaan, S.; Pauliuk, S.; van Vuuren, D. P.; van der Voet, E.; Tukker, A. (2018): Scenarios for Demand Growth of Metals in Electricity Generation Technologies, Cars, and Electronic Appliances. In *Environ. Sci. Technol.* 52 (8), pp. 4950–4959.

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b05549#>, dernier accès : 25/7/2022.

DERA (2021): Batterierohstoffe für die Elektromobilität. DERA Themenheft 26. Berlin.

https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-21.pdf;jsessionid=3B846DF9F738469DBBA3465B6A725CA8.2_cid284?__blob=publicationFile&v=, dernier accès :23/9/2022.

DERA (2022): Preismonitor Rohstoffe März 2022. Edited by Deutsche Rohstoffagentur.

https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/Preisliste/pm_22_03.pdf?__blob=publicationFile, dernier accès : 8/7/2022.

Ding, W.; Haoyue, D.; Yacong, H.; Jing, H.; Lei, C.; Fang, Z.; Jiadao, W. (2020): Introduction of manganese based lithium-ion Sieve - A review. In *Progress in Natural Science: Materials International* (30), pp. 139–152.

Dolega, P.; Bulach, W.; Betz, J.; Degreif, S.; Buchert, M. (2021): Green technologies and critical raw materials - Strategies for a circular economy. Policy Brief.

<https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Green-technologies-and-critical-raw-materials.pdf>, dernier accès : 8/7/2022.

Drazen, J. C.; Smith, C. R.; Gjerde, K. M.; Haddock, S. H. D.; Carter, G. S.; Choy, C. A.; Clark, M. R. et al. (2020): Midwater ecosystems must be considered when evaluating environmental risks of deep-sea mining. In PNAS 117 (30), pp. 17455–17460.

Commission européenne (2020a): Règlement du Parlement européen et du Conseil relatif aux batteries et aux déchets de batteries, abrogeant la directive 2006/66/CE et modifiant le règlement (UE) 2019/1020

Gillard, Benjamin; Purkiani, Kaveh; Chatzievangelou, Damianos; Vink, Annemiek; Iversen, Morten H.; Thomsen, Laurenz (2019): Physical and hydrodynamic properties of deep sea mining-generated, abyssal sediment plumes in the Clarion Clipperton Fracture Zone (eastern-central Pacific). In *Elementa: Science of the Anthropocene* 7, Article 5. DOI: 10.1525/elementa.343.

Giurco, D.; Dominish, E.; Florin, N.; Watari, T. (2019): Requirements for Minerals and Metals for 100% Renewable Scenarios. In S. Teske (Ed.): Achieving the Paris Climate Agreement Goals. Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non-energy GHG Pathways for +1.5°C and +2°C, pp. 437–457.

Hilbert, I.; Manhart, A.; Damtie, M. (forthcoming): Review of EPR practices for batteries & Benefit analysis for Ethiopia.

ICMM (2019): International reporting template for the public reporting of exploration targets, exploration results, mineral resources and mineral reserves. Edited by International Council on Mining and Metals.

https://www.criresco.com/docs/CRIRSCO_International_Reporting_Template_November_2019.pdf, dernier accès : 11/7/2022.

Jacoby, M. (2019): It's time to get serious about recycling lithium-ion batteries. In *Chemical & Engineering News*, 7/14/2019.

<https://cen.acs.org/materials/energy-storage/time-serious-recycling-lithium/97/i28>, dernier accès : 23/9/2022.

Kuhn, T.; Wegorzewski, C.; Rühlemann, C.; Vink, A. (2018): Composition, Formation, and Occurrence of Polymetallic Nodules. In R. Sharma (Ed.): Deep-Sea Mining - Resource Potential, Technical and Environmental Considerations: Springer, pp. 23–71.

Levin, Lisa A.; Wei, Chih-Lin; Dunn, Daniel C.; Amon, Diva J.; Ashford, Oliver S.; Cheung, William, W. et al. (2020): Climate change considerations are fundamental to management of deep-sea resource extraction. In *Glob Change Biol* (26), pp. 4664–4678.

Lyons, K. (2021): Deep-sea mining could start in two years after Pacific nation of Nauru gives UN ultimatum. In *The Guardian* 2021, 6/30/2021.
<https://www.theguardian.com/world/2021/jun/30/deep-sea-mining-could-start-in-two-years-after-pacific-nation-of-nauru-gives-un-ultimatum>, dernier accès : 18/7/2022.

Manhart, A.; Betz, J.; Schleicher, T.; Hilbert, I.; Smit, R.; Jung, H. et al. (2022): Management of End-of-life Li-ion Batteries through E-waste Compensation in Nigeria.
https://prevent-waste.net/wp-content/uploads/2022/05/Management-of-End-of-life-Li-ion-Batteries-through-E-waste-Compensation-in-Nigeria_Feasibility-Study_ECoN.pdf, dernier accès : 4/10/2022.

Manhart, A.; Blepp, M.; Fischer, C.; Graulich, K.; Prakash, S.; Priess, R. et al. (2016): Resource Efficiency in the ICT Sector. Edited by Greenpeace.
https://www.greenpeace.de/publikationen/20161109_oeko_resource_efficiency_final_full-report.pdf, dernier accès : 13/7/2022.

Mexico News (2017): 45 days a year spent commuting in CDMX. In *Mexico News* 2017,12/1//2017.
<https://mexiconewsdaily.com/news/45-days-a-year-spent-commuting-in-cdmx/>, dernier accès : 4/10/2022.

Miller, Kathryn A.; Brigden, K.; Santillo, David; Currie, D.; Johnston, Paul; Thompson, Kirsten F. (2021): Challenging the Need For Deep Seabed Mining From the Perspective of Metal Demand, Biodiversity, Ecosystems Services, and Benefit Sharing. In *Front. Mar. Sci.* 8, Article 706161.

Miller, Kathryn A.; Thompson, Kirsten F.; Johnston, Paul; Santillo, David (2018): An Overview of Seabed Mining Including the Current State of Development, Environmental Impacts, and Knowledge Gaps. In *Front. Mar. Sci.* 4, Article 418. DOI: 10.3389/fmars.2017.00418.

Mining Technology (2021): Top ten biggest lithium mines in the world. <https://www.mining-technology.com/analysis/top-ten-biggest-lithium-mines/>, mis à jour le 8/9/2021, cdernier accès : 14/7/2022.

Niner, Holly J.; Ardron, Jeff A.; Escobar, Elva G.; Gianni, Matthew; Jaeckel, Aline; Jones, Daniel O. B. et al. (2018): Deep-Sea Mining With No Net Loss of Biodiversity—An Impossible Aim. In *Front. Mar. Sci.* 5, Article 53. DOI: 10.3389/fmars.2018.00053.

Obi, D. (2018): Lagos commuters lose 75% of weekly working hours to traffic. In *Business Day*, 12/11/2018. <https://businessday.ng/uncategorized/article/lagos-commuters-lose-75-of-weekly-working-hours-to-traffic/>, dernier accès : 4/10/2022.

Orcutt, Beth N.; Bradley, James A.; Brazelton, William J.; Estes, Emily R.; Goordial, Jacqueline M.; Huber, Julie A. et al. (2020): Impacts of deep-sea mining on microbial ecosystem services. In *Limnol Oceanogr* 65 (7), pp. 1489–1510. DOI: 10.1002/lno.11403.

Paris, K.; Atacama, S. P. de (2022): Green commodities - The new superpowers. In *The Economist* 2022, 3/26/2022.

PREVENT Waste Alliance & StEP (2022): Practicel Experiences with the Basel Convention: Challanges, Good Practices and Ways to Improve Transboundary Movements of E-Waste in Low and Middle Income Countries. Discussion paper. https://prevent-waste.net/wp-content/uploads/2022/04/PREVENT-StEP_Practical_Experiences_Basel-Convention_discussion-paper-2022.pdf, dernier accès : 4/10/2022.

Schmidt, M. (2022): Rohstoffrisikobewertung - Lithium 2030. Update. Edited by Deutsche Rohstoffagentur (DERA). https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/vortrag-lithium-schmidt-22.pdf;jsessionid=9E72EE6CA650B03DE17B152B244EDD3C.2_cid284?__blob=publicationFile&v=2, dernier accès : 13/7/2022.

Sen, P. K. (2018): Sustainable Processing of Deep-Sea Polymetallic Nodules. In R. Sharma (Ed.): Deep-Sea Mining - Resource Potential, Technical and Environmental Considerations: Springer, pp. 395–422.

Sharma, R. (2018): Deep-Sea Mining: Current Status and Future Considerations. In R. Sharma (Ed.): Deep-Sea Mining - Resource Potential, Technical and Environmental Considerations: Springer, pp. 3–21.

Smith, Craig R.; Tunnicliffe, Verena; Colaço, Ana; Drazen, Jeffrey C.; Gollner, Sabine; Levin, Lisa A. et al. (2020): Deep-Sea Misconceptions Cause Underestimation of Seabed-Mining Impacts. In *Trends in ecology & evolution* 35 (10), pp. 853–857. DOI: 10.1016/j.tree.2020.07.002.

Sojka, R.; Pan, Q.; Billmann, L. (2020): Comparative study of Lithium-ion battery recycling processes. Edited by ACCUREC Recycling GmbH.

Sommerfeld, M.; Friedmann, D.; Kuhn, T.; Friedrich, B. (2018): "Zero-Waste": A Sustainable Approach on Pyrometallurgical Processing of Manganese Nodule Slags. In *Minerals* 2018 (544). <https://www.mdpi.com/2075-163X/8/12/544>, dernier accès : 20/7/2022.

Spearman, Jeremy; Taylor, Jonathan; Crossouard, Neil; Cooper, Alan; Turnbull, Michael; Manning, Andrew et al. (2020): Measurement and modelling of deep sea sediment plumes and implications for deep sea mining. In *Scientific reports* 10 (1), p. 5075. DOI: 10.1038/s41598-020-61837-y.

Stratmann, Tanja; Lins, Lidia; Purser, Autun; Marcon, Yann; Rodrigues, Clara F.; Ravara, Ascensão et al. (2018): Abyssal plain faunal carbon flows remain depressed 26 years after a simulated deep-sea mining disturbance. In *Biogeosciences* 15 (13), pp. 4131–4145. DOI: 10.5194/bg-15-4131-2018.

The metals company (2021): A battery in a rock. Polymetallic nodules are the cleanest path toward electric vehicles. <https://metals.co/nodules/>, dernier accès : 18/7/2022.

The metals company (2022): 2021 Annual Report. <https://investors.metals.co/static-files/8717d24b-14aa-4cc8-bb7f-a4abf35296ff>, dernier accès : 18/7/2022.

TMR Research (2022): TMR Advanced Rare-Earth Projects Index.

<https://www.techmetalsresearch.net/metrics-indices/tmr-advanced-rare-earth-projects-index/>, mis à jour le 19/10/2022.

UN-DESA (2018): World Urbanization Prospects: The 2018 Revision.

<https://population.un.org/wup/Download/>, dernier accès : 20/4/2022.

UNEP FI (2022): Harmful Marine Extractives: Undestranging the risks & impacts of financing non-renewable extractive industries. UNEP (Programme des Nations unies pour l'environnement). Genève.

USGS (2022): Mineral Commodity Suammaries 2022. <https://doi.org/10.3133/mcs2022>, dernier accès : 20/7/2022.

Vanreusel, Ann; Hilario, Ana; Ribeiro, Pedro A.; Menot, Lenaick; Arbizu, Pedro Martínez (2016): Threatened by mining, polymetallic nodules are required to preserve abyssal epifauna. In *Scientific reports* 6, p. 26808. DOI: 10.1038/srep26808.

Washburn, Travis W.; Turner, Phillip J.; Durden, Jennifer M.; Jones, Daniel O.B.; Weaver, Philip; van Dover, Cindy L. (2019): Ecological risk assessment for deep-sea mining. In *Ocean & Coastal Management* 176, pp. 24–39. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2019.04.014.

Willing, N. (2020): LFP battery switch drives supply chain changes.

<https://www.argusmedia.com/en/news/2130049-lfp-battery-switch-drives-supply-chain-changes>, dernier accès : 19/10/2022.

Wunderlich-Pfeiffer, F. (2022): Die Revolution der Natrium-Akkus wird absehbar. In *golem.de* 2022, 10/12/2022.

<https://www.golem.de/news/akkutechnik-die-revolution-der-natrium-akkus-wird-absehbar-2210-168344.html>, dernier accès : 10/19/2022.

Zhao, F.; Jiang, X.; Wang, S.; Feng, L.; Li, D. (2020): The Recovery of Valuable Metals from Ocean Polymetallic Nodules Using Solid-State Metalized Reduction Technology. In *Minerals* 10 (20).