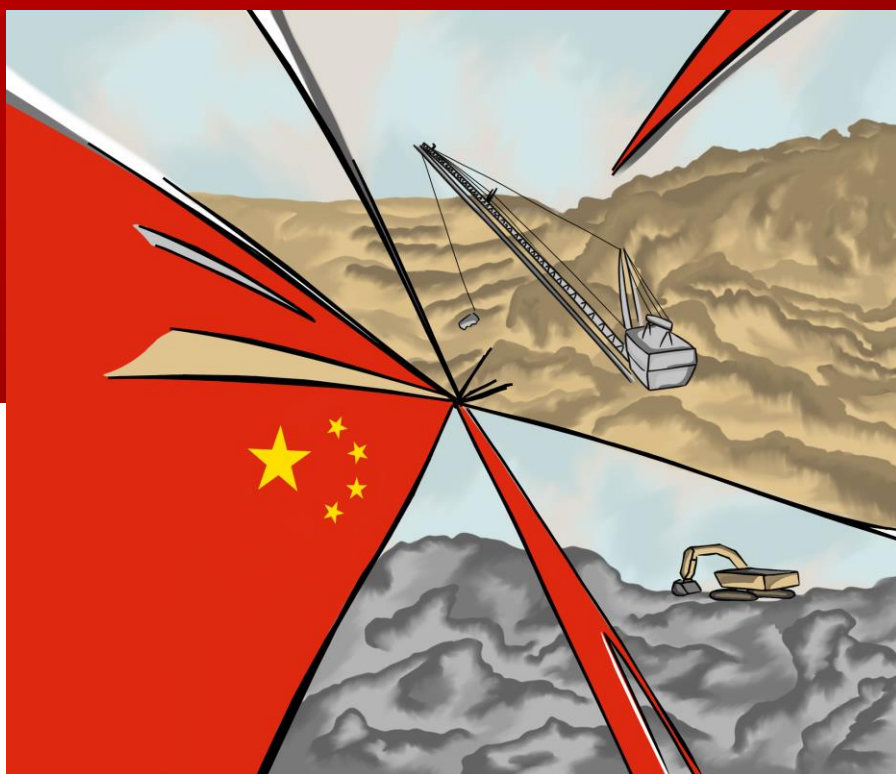


LA MINE CHINOISE À L'ÉPREUVE DU XXI^e SIÈCLE

REPENSER LA CRITICITÉ DES MÉTAUX NON-FERREUX EN CHINE

Archibald ANDRÉ



ÉTUDES DU CQEG n°9

Décembre 2023

LA MINE CHINOISE À L'ÉPREUVE DU XXI^E SIÈCLE

REPENSER LA CRITICITÉ DES MÉTAUX NON-FERREUX EN CHINE

Archibald ANDRÉ

Étudiant en 4^e année de diplôme de Sciences Po Lyon - Affaires Internationales - Firmes et mondialisation

archibald.andre@sciencespo-lyon.fr

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	5
1. Méthodologie d'une approche quantitative de la criticité des métaux en Chine	8
1.1 Définition et perspective historique	8
1.2 Construction de la méthodologie	11
2. Analyse des résultats	17
2.1. Analyse de la matrice de criticité chinoise	17
2.2. Impact environnemental : Analyser plus précisément la troisième dimension et l'impact environnemental des métaux non-ferreux	20
2.3. Une perspective en temps et en lieu : comparaison internationale et projection du modèle	23
2.3.1 Comparaison internationale : l'hégémonie chinoise sur le marché des métaux	24
2.3.2 Projections dans le temps, un modèle en proie à des dynamiques contraires	26
3. Une approche stratégique des métaux critiques	32
3.1 L'industrie des métaux non-ferreux sur le modèle du vol d'oies sauvages	32
3.1.1 Évolution de la politique chinoise	32
3.1.2 Concentrer pour mieux régner, la naissance des grands groupes miniers chinois	34
3.2. Pollutions et enjeux écologiques du secteur minier chinois : de l'impuissance d'une filière à la « civilisation écologique »	35
3.2.1 Les différents types de pollution liés à l'industrie minière	35
3.2.2 La « civilisation écologique », un idéal pour le gouvernement chinois	37

3.3. Les politiques gouvernementales : dompter une industrie récalcitrante	38
3.3.1 Règlementations sur la prospection et l'extraction	38
3.3.2 Les quotas en Chine.....	39
3.3.3 La mine illégale et les politiques gouvernementales anticorruption	42
3.4. Les métaux stratégiques comme armes géopolitiques	44
Conclusion	46
Références.....	48

Summary

This paper provides an overview of China's mining sector and the issues that characterize it at the dawn of the 21st century. An in-depth methodology of non-ferrous metal criticality captures the geo-economic, geopolitical and environmental stakes of an industry at the heart of the ecological transition. On the other hand, the shortcomings of such an indicator require further analysis. Indeed, an approach centered around the Chinese notion of "strategicity" provides a new translation of the dynamics at work in China: from strategic investments as part of the New Silk Roads to the internationalization of illegal mines.

Keywords: Chinese mining sector, geopolitics of metals, criticality, new Silk Roads, ecological transition, resource depletion, trade war.

Résumé

Cette recherche dresse un panorama du secteur minier chinois et des enjeux qui le caractérisent à l'aube du XXI^e siècle. Une méthodologie approfondie de la criticité des métaux non-ferreux rend compte des enjeux géoéconomiques, géopolitiques et environnementaux d'une industrie au cœur de la transition écologique. D'un autre côté, les lacunes d'un tel indicateur nécessitent une analyse complémentaire. En effet, une approche centrée autour de la notion chinoise de « stratégicité » apporte une traduction nouvelle des dynamiques à l'œuvre en Chine : des investissements stratégiques dans le cadre des Nouvelles routes de la soie à l'internationalisation des mines illégales.

Mots-clés : secteur minier chinois, géopolitique des métaux, criticité, nouvelles Routes de la Soie, transition écologique, épuisement des ressources, guerre commerciale.

Liste des acronymes

Al	Aluminium	Mn	Manganèse
Ag	Argent	Mo	Molybdène
Au	Or	Ni	Nickel
Co	Cobalt	NTIC	Nouvelles Technologies de l'Information et des Communications
Cr	Chrome	Pb	Plomb
Cu	Cuivre	PCC	Parti Communiste Chinois
GES	Gaz à Effet de Serre	PDG	Président-Directeur Général
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat	PGM	Platinoïdes
Hg	Mercure	R&D	Recherche & Développement
HHI	Herfindahl–Hirschman index	REE	Terres rares
HRR	Terres rares Lourdes	RDC	République Démocratique du Congo
IDE	Investissement Direct à l'Étranger	RPC	République populaire de Chine
ISA	<i>International Seabed Authority</i>	Sb	Antimoine
ISO	Organisation Internationale de Normalisation	Si	Silicone
Li	Lithium	Sn	Étain
LRR	Terres rares légères	Ti	Titane
Mg	Magnésium	W	Tungstène
		Zn	Zinc

Introduction

« Les menaces minières pour la biodiversité augmenteront à mesure que de plus en plus de mines ciblent des matériaux nécessaires à la production d'énergie renouvelable, et sans une planification stratégique, ces nouvelles menaces pour la biodiversité pourraient dépasser celles évitées par l'atténuation du changement climatique. »¹

C'est par ces mots que Laura J. Sonter conclut un article publié dans la revue *Nature* en 2020 (Sonter, Dade, Watson, & Valenta, 2020). Autrement dit, notre quête pour la préservation de l'environnement pourrait mettre en péril ces écosystèmes que l'on désire sauvegarder. Du Charybde des énergies fossiles au Scylla des métaux, les nouvelles technologies vertes non émettrices de CO₂ poussent insidieusement vers de nouvelles problématiques et de nouvelles dépendances. En effet, alors que le consensus scientifique se fait toujours plus grand quant à la menace du réchauffement climatique et la nécessité d'une transition vers un modèle de société décarboné (Mann, 2022)², se posent désormais de cruelles questions : la transition énergétique est-elle possible et à quel prix ?

Bien qu'ils réapparaissent en force dans le débat public³, les enjeux d'approvisionnement en ressources ne sont pas récents. Certaines périodes historiques font références à des métaux ou des alliages découverts et utilisés à leur époque⁴. Contrairement à une idée reçue, le commerce de matières premières représentait une composante majeure de l'économie et de la vie durant l'Antiquité et l'époque médiévale (Boisseuil, Rico, & Gelichi,

-
- 1 La citation originale est la suivante: « Mining threats to biodiversity will increase as more mines target materials for renewable energy production and, without strategic planning, these new threats to biodiversity may surpass those averted by climate change mitigation. ». Traduction libre.
 2. La notion de modèle décarboné est contre-intuitive. Elle suppose étymologiquement le développement d'une société sans émissions de dioxyde de carbone (CO₂). La littérature scientifique ayant largement réévalué à la hausse le rôle d'autres Gaz à Effet de Serre (GES), on inclut conventionnellement les principaux GES sous le terme de « décarbonation ». Les principaux sont le CO₂, le méthane (CH₄), et le protoxyde d'azote (N₂O). Les différents gaz ayant des effets de serre divergents, on parle « d'émissions équivalent carbone » pour englober l'ensemble de ces GES sous un seul indicateur.
 3. On peut, entre autres, évoquer Bezat, 2022 ; Nodé-Langlois, Bohineust, & Cheyvalle, 2021 ; Stéphant, 2023 ; Bihouix, 2018. Certains de articles et interviews comptabilisent des millions de vues.
 4. On parle de l'Âge du cuivre, l'Âge du bronze, l'Âge de fer... À noter qu'il s'agit d'âges préhistoriques qui ne se limitent pas à l'Europe. L'âge du fer, par exemple, joue un rôle important en Asie et en Afrique.

2021). Jusqu'au XV^e siècle, les routes de la Soie sont l'emblème d'un commerce entre les Empires chinois et l'Europe qui pallient leurs manques domestiques par des importations en provenance de pays naturellement plus dotés (Frankopan, 2017).

La perspective d'un « doux commerce » apaisant les mœurs et les relations diplomatiques laisse espérer qu'à mesure que les pays travaillent de concert, la stabilité internationale s'affermisse. Au contraire, Ali Laidi affirme que c'est même cette compétition pour l'accès aux ressources qui tisse la trame de l'Histoire et oppose les puissances de chaque époque dans une guerre économique. Des Croisés aux Empires coloniaux en passant par la ligue de la Hanse, il décrit comment les aspirations mercantilistes et la quête de ressources font et défont les alliances séculaires et les paix fragiles (Laidi, 2016). Les révolutions industrielles du XIX^e et du XX^e siècle représentent un tournant majeur pour le secteur minier : on découvre de nouveaux éléments, de nouveaux procédés d'extraction mais aussi de nouvelles applications à ces métaux. En effet, tandis qu'au XVIII^e siècle, seule une poignée d'éléments trouvait des applications économiques, Yann Foucaud rappelle que c'est presque l'entièreté de la table de Mendeleïev⁵ qui est aujourd'hui mobilisée. Plus encore, le fer-de-lance de la technologie moderne consomme une part toujours plus diverse et importante de métaux afin d'optimiser au mieux les multiples propriétés de chaque élément. Certains secteurs voués à croître fortement durant les prochaines décennies comme les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC) ou les énergies renouvelables sont d'importants consommateurs en métaux et alliages (Foucaud, 2023).

Le terme « *critical raw materials* »⁶ apparaît en 1939 dans un rapport de la Chambre des Représentants de 1939 intitulé « *Strategic and Critical Materials Stock Piling Act* ». Durant la Guerre froide, le contexte de tension géopolitique entre les deux superpuissances de l'Est et de l'Ouest et la gravitation du reste de la scène internationale autour de leurs blocs imperméables a poussé les analystes à étudier l'autonomie respective de ces puissances en différentes ressources vitales pour leur économie et leur sécurité. Avec la chute de l'URSS, l'usage du terme disparaît (Speirs, Hourì, & Gross, 2013). Mais ces dernières années témoignent d'un retour en force de la notion et de l'étude sur la disponibilité. Le terme générique de criticité est une mesure du risque de défaillance et de

5. Aussi connue sous le nom de tableau périodique des éléments, cette table classifie l'ensemble des éléments chimiques connus selon leur numéro atomique. Son invention est liée au chimiste Russe Dmitri Ivanovitch Mendeleïev qui publie un premier modèle en 1869.

6. Qui pourrait être traduit en français par « matières premières critiques ».

l'impact d'une défaillance sur un système. De fait, il qualifie le niveau d'acceptabilité d'un tel risque. La criticité fait référence à la vulnérabilité de certains métaux dans le contexte économique, technologique et géopolitique actuel. Cela peut être dû à la rareté du métal, à sa concentration géographique dans un faible nombre d'États, à sa consommation en hausse, etc. La criticité considère les préoccupations de ruptures d'approvisionnement et des impacts que cela peut avoir sur l'économie d'une nation. De fait, les pays dépendants de l'importation de ces métaux critiques sont vulnérables aux conflits commerciaux et géopolitiques. Lorsqu'elle sert à qualifier une ressource, la criticité englobe traditionnellement deux dimensions :

- L'importance économique
- La difficulté d'approvisionnement

La corrélation entre ces deux variables permet de construire une matrice de criticité qui croise l'importance économique avec la difficulté d'approvisionnement d'une ressource. Il est important de considérer ces deux dimensions comme subjectives et propres à l'acteur qui en dresse le bilan. Ainsi les différents critères et composantes de la criticité évoluent selon les époques, les obstacles repérés et conscientisés par l'acteur. Dans le débat public, la notion de « métaux critiques » est parfois confondue avec celle de « terres rares ». Cette catégorie regroupe 17 éléments du tableau de Mendeleïev⁷ aux propriétés chimiques proches. Contrairement à ce que laisse supposer leur nom (issue des croyances de l'époque de leur découverte), leur occurrence géologique est loin d'être rare, il en existe d'importantes quantités dans la croûte terrestre. Cependant, les taux élevés de concentration de terres rares sont exceptionnels. De fait, les terres rares peuvent être des métaux critiques pour certains pays mais pas pour d'autres et ne sont jamais les seuls métaux critiques pour l'économie d'un pays. Parce qu'ils varient selon les intérêts et les caractéristiques de chaque acteur, les différents critères qui composent la notion de criticité diffèrent sensiblement d'un État à l'autre.

La Chine dispose d'une situation bien particulière dans le secteur minier. D'un point de vue économique, les réformes de Deng Xiaoping et ses successeurs ont progressivement fait un géant. Abritant d'importantes réserves, la République populaire de Chine est

7. On inclut généralement les 15 éléments de la famille des lanthanides : le lanthane, le cérium, le praséodyme, le néodyme, le prométhium, le samarium, l'euporium, le gadolinium, le terbium, le dysprosium, l'holmium, l'erbium, le thulium, l'ytterbium, le lutécium ainsi que le scandium et l'yttrium. Leur découverte date de 1788 par des mineurs suédois. Certaines méthodologies scindent les terres rares (REE) en deux catégories : les terres rares lourdes (HREE) et les terres rares légères (LREE).

aujourd'hui un des principaux producteurs et consommateurs de nombreux métaux non-ferreux. Son industrie profite d'une domination de marché voire d'un quasi-monopole concernant l'extraction et le raffinage de dizaines d'entre eux dont l'aluminium, le cuivre, le zinc ou les terres rares. Dans un même temps elle subit le contrecoup écologique d'une industrie polluante sur son sol, ce qui pousse le gouvernement à renforcer les régulations environnementales et assurer ses approvisionnements en ressources à l'étranger. De fait, la Chine cristallise les nombreux enjeux de la filière des mines au XXI^e siècle et comprendre les dynamiques qui l'animent offre un nouveau regard sur les tensions qui parsèment le secteur et les grandes perspectives qui se dessinent.

Quels métaux non-ferreux revêtent des enjeux critiques ou stratégiques aux yeux de la Chine ? Comment inclure les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) lors du calcul de l'impact environnemental des métaux en Chine ? L'importance stratégique de certains métaux est-elle utilisée à des fins économiques ou géopolitiques par le PCC ?

1. Méthodologie d'une approche quantitative de la criticité des métaux en Chine

Tout d'abord, il convient de développer une méthodologie à même de dresser une représentation fiable de l'importance des différents métaux non-ferreux pour l'économie chinoise. Après avoir proposé un rapide panorama des méthodologies existantes et des concepts maniés par la littérature chinoise, nous proposerons une formule de la criticité des métaux non-ferreux en trois dimensions. La première dimension indique l'importance économique d'un métal, la deuxième traduit sa difficulté d'approvisionnement et les risques de pénuries. Enfin, nous insisterons sur l'importance d'une troisième branche représentant l'impact environnemental d'un métal sur le territoire chinois.

1.1 Définition et perspective historique

La criticité d'un métal fluctue selon le prisme abordé et l'acteur qui est considéré. En effet, une ressource qui manque pour un pays pourrait se trouver en abondance dans les sols d'un second. Les relations diplomatiques, économiques, le niveau de corruption, de développement, la nature et les besoins des différentes industries nationales sont autant d'indices qui peuvent faire évoluer l'importance d'un métal d'un pays à l'autre. De plus, l'importance accordée à une variable plutôt qu'à une autre peut, elle aussi, varier selon les lieux et les époques.

La notion même de criticité fait débat en Chine⁸. D'une part, considérée comme anglo-saxonne et importée, elle n'apparaît dans aucun document officiel du Parti. D'autre part, la position avantageuse de la Chine dans le secteur minier rend le pays faiblement dépendant aux importations et donc aux ruptures d'approvisionnement. Pour le remplacer, une poignée de termes est utilisée à sa place. Les auteurs de ces concepts sont des académiciens profitant d'une double casquette par la place qu'ils jouent au sein d'institutions ou d'organismes gouvernementaux. Parmi eux, des géologues réputés et spécialistes des enjeux miniers interrogent la notion chinoise de « minerais stratégiques » (战略性矿产 *zhàn lüè xìng kuàng chǎn*) (Andersson, 2020)⁹. Ces experts participent à la « pratique bureaucratique de classification » qui forme l'ossature des politiques gouvernementales chinoises. En sélectionnant les différents paramètres qui composent un indice stratégique des métaux, en valorisant certaines caractéristiques plutôt que d'autres, ils influencent la forme prise par les politiques publiques du régime. En cela, l'autorité et le savoir dont ces académiciens disposent leur confèrent un pouvoir politique de catégorisation des « matériaux d'importance » en « matériaux critiques ». En Chine, les experts avec le plus grand pouvoir d'influence sur la construction de dimension critique et stratégique des métaux se trouvent dans les principaux organes de recherche affiliés à cinq ministères dont le ministère du Commerce, le ministère des Ressources naturelles, et le ministère de l'Éducation. C'est aussi le cas du ministère de l'Industrie et des technologies de l'information, ainsi que la commission du Développement et la réforme nationale (Andersson, 2020).

L'origine de la notion de métaux stratégiques en Chine remonte à un article de 1951 du *Quotidien du Peuple* intitulé « Bloody Business : comment les propriétaires et les hommes d'affaires d'Amérique latine s'enrichissent durant la guerre »¹⁰. L'article critique vivement la position des États-Unis qui tentent de monopoliser l'achat de nombreux métaux stratégiques. Pour autant, le terme n'apparaît dans des revues académiques qu'à partir des années 1950 sans faire l'objet de débats publics. La formulation ne s'impose aux plus

8. Le terme de criticité apparaît dans les débats chinois sur les métaux stratégiques. Il est traduit en chinois à travers deux termes proches. Le premier est 危机 (*weiji*) dont la traduction littérale est « crise », on parle alors de « minéraux de crise » (危机矿产 *weiji kuangchan*). Le second terme usité se traduit littéralement par « essentiel » (关键 *guān jiàn*). La traduction au plus proche du sens initial des mots donne « minéraux clés » ou minéraux essentiels » (关键矿产 *Guānjiàn kuàngchǎn*).

9. Le terme original utilisé dans l'article est la traduction anglaise « *strategic minerals* ».

10. Le nom original de l'article est : « 血腥的生意—拉丁美洲的地主和商人怎样在战争中发财 » (*xuè xīng de shēng yì - lā dīng měi zhōu de dì zhǔ hé shāng rén zěng yàng zài zhànzhēng zhōng fā cái*), traduit en anglais par « *Bloody Business – How Landlords and Businessmen in Latin America Get Rich in War* ».

hauts sommets de l'État qu'avec l'utilisation du terme par Wen Jiabao (温家宝 *Wēn jiābǎo*), alors vice Premier ministre, lors d'un discours visant à inciter à l'exploration de minerais stratégiques sur le territoire chinois ; puis au sein de documents officiels comme le dixième plan quinquennal pour les terres et les ressources (State Council, 2016 a et b). La notion possède de nombreuses définitions qui regroupent la plupart du temps au moins six éléments dont l'importance économique ; l'importance pour la défense nationale ; la difficulté d'approvisionnement ; ainsi que d'autres moins fréquents tels que la dimension durable des métaux, leur utilisation par des industries émergentes ou encore l'avantage comparatif de la Chine sur d'autres pays (Andersson, 2020).

En 2016, le gouvernement chinois a proposé une première liste des « métaux stratégiques » (战略性矿产 *Zhànlüè xìng kuàngchǎn*) selon leur dimension stratégique (战略性 *zhàn lüè xìng*)¹¹. Celle-ci inclut 24 ressources dont le chrome, le cuivre, l'aluminium, l'or, le nickel, le tungstène, l'étain, le molybdène, l'antimoine, le cobalt, le lithium, les terres rares et le zirconium. Le reste concerne des ressources énergétiques, le fer ou encore des minéraux non-métalliques (Andersson, 2020). Le gouvernement chinois ayant publié cette liste de métaux dits stratégiques, les détails de calculs de cette liste ne sont pas publics. La notion est alors devenue particulièrement prisée et fait l'objet d'un véritable débat dans le monde académique. Parmi les études les plus citées des années 2000 qui fondent le cœur du débat sur la question, trois sortent du lot. La première définition est ainsi proposée par Chen Yuchuan, alors membre de l'Académie chinoise d'ingénierie. Il définit un métal critique comme un métal indispensable à l'économie du pays, à son développement social et sa défense nationale qui ne peut être produit en Chine et qui peut influencer les marchés internationaux. D'un autre côté, un article de Wang Ruijiang, ancien directeur de l'Institut des ressources minérales, centre davantage la dimension stratégique d'un métal sur son impact international et estime que le nombre de métaux stratégiques d'un pays est ainsi un « *important indicateur de la puissance d'un pays* » (Andersson, 2020). Il propose ainsi deux critères : un métal stratégique est un métal pour lequel la Chine repose lourdement sur des importations et dont une pénurie entraînerait d'importantes conséquences économiques et sécuritaires. Cette partie fait référence à la notion de « métaux à risque de pénurie » (短缺 / 紧缺矿产 *duǎnquē / jǐnquē kuàngchǎn*)¹² ou celle plus précise de « minerais contraints par la technologie » (技术制约

11. La notion originale de dimension stratégique est traduite de l'anglais « *strategic-ness* » qui pourrait correspondre à l'énallage français « *stratégicité* ».

12. La traduction littérale du terme « 短缺 » (*duǎnquē*) est « *pénurie* » tandis que « 紧缺 » (*jǐnquē*) se traduit par « *en quantité limitée* ».

型矿产 *jìshù zhìyuē xíng kuàng chǎn*) dont la production est limitée par l'absence de technologies avancées en Chine (Andersson, 2020)¹³.

Utilisées comme synonymes dans la littérature occidentale, les notions de « métaux critiques » et « métaux stratégiques » font ainsi l'objet d'une distinction dans le débat académique chinois. En partie du fait de la position dominante de la Chine dans ce secteur, la notion de « métal stratégique » est donc chargée d'un pouvoir d'influence dont ne dispose pas celle de « criticité », purement axée sur les vulnérabilités internes du pays. Ici, les métaux sont davantage considérés comme des ressources convoitées que des instruments dans la poursuite de certains objectifs stratégiques.

1.2 Construction de la méthodologie

La méthodologie de ce mémoire se rapproche de celle développée par l'Union Européenne et son comité : « *EU Raw Material Supply Group* » (Commission Européenne, 2023). La méthodologie de la Commission offre une analyse avec un double axe importance économique / difficulté d'approvisionnement. Ce mémoire reprend les travaux de chercheurs de l'université de Beijing et complète leur méthodologie du risque environnemental de Yan, Wang, Cao, Zhang, & Sun, (2021). Cette étude saisit aussi l'opportunité de compléter la méthodologie européenne en y ajoutant la troisième dimension du risque environnemental liée à la production d'un métal. Elle fut la première à réaliser une analyse de la criticité des métaux à l'échelle du pays, en se penchant sur le cas de soixante-quatre ressources présentes dans le tableau périodique des éléments (sont exclus les éléments gazeux, des actinides ainsi que des éléments aux données trop parcellaires et constituant une faible demande pour nos sociétés contemporaines). Ce mémoire se concentre sur une poignée de métaux non-ferreux faisant partie de la liste¹⁴.

L'apport de ce mémoire à la littérature existante est d'insister sur le rôle écologique et climatique des ressources et de leur offrir une part entière dans la formule de la criticité et ce, pour préciser les travaux académiques sur la question.

13. Cette liste de termes connexes n'est pas exhaustive mais regroupe seulement les notions les plus usitées. On peut à titre de complément citer les métaux de base stratégiques "*strategic staple minerals*," (大宗矿产 *dà zōng kuàng chǎn*) (Andersson, 2020).

14. Ce mémoire travaille sur 42 métaux différents dont le cuivre, le zinc, l'aluminium, le plomb, le nickel, l'étain, l'antimoine, le magnésium, le titane, le mercure, le tungstène, le molybdène, le cobalt, le chrome, l'or, l'argent le lithium, le silicone, le manganèse, l'indium. Certains de ces métaux sont regroupés dans des catégories communes et analysés communément. C'est le cas des terres rares ainsi que des platinoïdes.

Un métal est considéré comme critique lorsque l'une des trois dimensions étudiées dans ce mémoire dépasse un certain niveau. Il est cependant possible que plusieurs dimensions dépassent le seuil de criticité. De tels métaux revêtent une importance particulière selon les situations. Une criticité dans la dimension économique et le risque d'approvisionnement implique un métal indispensable à l'économie mais difficile à trouver ou produire, et donc susceptible d'entraîner des pénuries. Un indice environnemental et économique élevé implique un métal polluant mais indispensable. Enfin, un métal dont le niveau de criticité environnemental et d'approvisionnement serait haut définit des métaux à la fois polluants et susceptibles d'entraîner des pénuries. De fait, il ne peut se voir attribuer une importance économique forte sans mettre en péril l'économie qui l'exploite. La méthodologie utilisée pour calculer ces trois dimensions est explicitée ci-dessous (Yan, Wang, Cao, Zhang, & Sun, 2021). Plusieurs éléments sont à considérer pour mesurer la difficulté d'approvisionnement d'un métal. Tout d'abord il est nécessaire de produire un indicateur de la capacité d'un pays à répondre à ses propres besoins. Si ce n'est pas le cas, alors le pays en question importe les ressources qu'il consomme, ce qui le rend vulnérable à des chocs à l'extérieur de ses frontières. Pour cela, il est nécessaire de connaître la dépendance à l'import d'un pays. Une fois ce degré de dépendance connu, il faut prendre en considération la diversité des sources d'approvisionnement. En effet, si les ressources et la production d'un métal se concentrent dans un faible nombre de pays, alors, si ces pays ne parviennent plus à répondre à la demande, aucune alternative ne sera possible et l'ensemble de la production mondiale s'effondrera. À contrario, une production dispersée au sein d'un grand nombre de pays estompe les risques et limite l'ampleur de la crise si l'un d'entre eux venait à stopper sa production. Cet indicateur de la répartition de la production des métaux entre les pays du globe est mesuré par le *Herfindahl-Hirschman index* (HHI). Ces deux indicateurs mesurent le risque d'une rupture d'approvisionnement, mais il nous reste encore à considérer la résilience, la capacité d'adaptation en cas de crise. Pour cela, on considère le taux de recyclage du métal en question. Ce dernier montre la capacité d'un pays à fonctionner en autosuffisance en cas de rupture d'approvisionnement à partir des biens qui sont présents sur son territoire. En effet, un pays qui dispose d'un taux de recyclage élevé d'un métal réduit l'ampleur de pénurie lorsqu'elle advient en recyclant les déchets sur son sol. Enfin, la difficulté d'approvisionnement d'un métal peut être amoindrie par la substituabilité de ce dernier. En cas de rupture d'approvisionnement, la substituabilité d'un métal correspond à sa capacité à être remplacé par un autre aux propriétés chimiques similaires. En effet, si un métal vient à manquer mais que l'on dispose d'une alternative viable, efficace et en quantités suffisantes alors l'impact de la

pénurie sera moindre. De ce fait, il est important d'inclure la substituabilité du métal à la méthodologie.

Ainsi, notre formule de calcul inclut dans la méthodologie quatre éléments dont la dépendance à l'importation, la concentration de la production de métal sur la scène internationale, le taux de recyclage ainsi que le degré de substituabilité¹⁵.

Lorsque l'on établit **l'importance économique** (IE) d'un métal, il convient d'envisager l'entièreté de la chaîne de valeurs, car la rupture d'approvisionnement de ce métal peut potentiellement affecter l'ensemble des secteurs en aval. Il s'agit alors de mesurer le rôle du métal dans les différentes industries et secteurs où il est consommé avant d'évaluer l'importance du secteur économique en question pour l'économie du pays. Pour cela, on mobilise le PIB du pays en question pour contextualiser l'importance du métal par rapport à un pays spécifique, ici la République populaire de Chine. Ensuite, il est crucial d'inclure le prix de vente du métal sur les marchés nationaux ainsi que les quantités produites. S'ils ne suffisent pas à synthétiser l'importance économique d'un métal, les quantités vendues et le prix de ces dernières demeurent un indicateur incontournable. De plus, il est pertinent d'évaluer les secteurs qui consomment ces métaux. Certains secteurs sont d'une importance stratégique et un manque d'approvisionnement de ces secteurs aurait des répercussions à toutes les échelles de l'économie. C'est le cas du secteur de l'armement, des semi-conducteurs ou encore de l'énergie et des transports. De fait, il semble souhaitable d'inclure les secteurs de consommation de ces métaux. Cette information est étroitement liée à l'importance du métal dans la production du bien final. En effet, deux métaux peuvent être consommés par une même industrie mais jouer un rôle plus ou moins important, les conséquences d'une rupture varieront alors automatiquement en conséquence. Il faut donc considérer le secteur qui emploie le métal ainsi que l'importance que joue ce métal dans cette industrie spécifique.

15. Les formules mathématiques sont disponibles dans la version originale de ce mémoire accessible sur le site de Sciences Po Lyon. Les détails de ces calculs peuvent être directement demandés auprès de l'auteur de l'étude.

L'IE regroupe alors quatre éléments : un indicateur de la valeur d'un métal, sa part dans le PIB chinois, la valeur des industries qui en consomment, ainsi que l'importance du métal dans ces industries¹⁶.

La méthodologie originale pour mesurer le **risque environnemental (RE)** nécessite tout d'abord d'évaluer la toxicité du métal. Plus cette toxicité est élevée, plus son impact environnemental sera important. Il faut alors lier à cette toxicité les quantités de déchets émis dans l'environnement. Ces déchets peuvent être liquides, solides ou gazeux, toutes ces formes doivent être incluses dans les calculs pour se rapprocher le plus fidèlement possible de l'impact environnemental d'un métal donné. Une fois la toxicité d'un métal et les quantités déversées connues, il reste à évaluer les politiques publiques mises en place pour limiter les rejets de déchets, les politiques de traitements, d'assainissement, de réhabilitation des espaces naturels après une exposition à des déchets toxiques. Il se trouve que l'Université de Yale produit chaque année un indicateur qui regroupe 25 sous-catégories et qui mesure l'efficacité des politiques environnementales d'un pays, ici encore la Chine.

Dès lors, trois grandes catégories étaient incluses dans la méthodologie : la toxicité du métal, les quantités de déchets émis lors de la production de ce métal ainsi que l'efficacité des politiques environnementales chinoises. **Le risque environnemental (RE)** était alors mesuré par la formule suivante :

$$ER_m = T_m \left(\frac{Q_{wg.m} + Q_{wl.m} + Q_{ws.m}}{Q_{wg} + Q_{wl} + Q_{ws}} \right) EPI_{CN}$$

Dans cette formule, ER indique le Risque environnemental d'un métal m. T_m indique la toxicité du métal m que l'on va multiplier par les quantités de déchets gazeux ($Q_{wg.m}$), liquides ($Q_{wl.m}$) et solides émises pour produire une tonne de ce métal ($Q_{ws.m}$). Ces quantités de déchets sont rapportées à la quantité totale de déchets gazeux (Q_{wg}), liquides (Q_{wl}) et solides (Q_{ws}) émis en Chine annuellement. Enfin, l' EPI_{CN} est un indicateur publié par l'Université de Yale annuellement pour mesurer les performances écologiques et les politiques environnementales publiques d'un pays, ici la Chine. L'indicateur comprend lui-même 25 sub-indicateurs (Yale University, 2023).

16. Les formules mathématiques sont disponibles dans la version originale de ce mémoire accessible sur le site de Sciences Po Lyon. Les détails de ces calculs peuvent être directement demandés auprès de l'auteur de l'étude.

Cette méthodologie a été développée et appliquée par l'université de Shanghai (Yan, Wang, Cao, Zhang, & Sun, 2021). Cette approche traite une quantité importante de données et reprend une méthodologie mature de l'Union européenne. La troisième dimension environnementale est en revanche plus récente et moins étudiée au sein de la littérature dans le domaine. Sa principale faiblesse est de ne considérer que la toxicité des métaux et la quantité de déchets toxiques rejetée par la filière. La facette des émissions de GES est occultée dans cette étude. Les rapports du GIEC insistent cependant sur l'importance des GES dans le dérèglement en cours et à venir. Il semble donc crucial d'en réaliser une estimation dans la perspective de dresser un bilan environnemental d'une activité ou d'une ressource (GIEC, 2013, 2014, 2023).

L'ambition de ce mémoire est ainsi de produire un indicateur des émissions de GES des différents métaux non-ferreux étudiés afin d'affiner l'approche environnementale des études portant sur la criticité. La formule précédente est ainsi complétée par deux éléments :

$$EC_m IC_m$$

Le premier indicateur EC_m mesure les émissions de GES d'un métal donné sur une échelle logarithmique. La valeur 1 correspondant à une industrie chinoise émettant 1 tonne d'équivalent CO_2 pour la production domestique d'un métal m. La valeur 10 correspond à une industrie émettant 1 000 000 000 tonnes d'équivalent CO_2 pour la production domestique d'un métal¹⁷. Le second indicateur IC_m mesure la quantité de tonnes de carbone émis lors de la production d'une tonne de métal¹⁸. Ces deux indicateurs permettent de mesurer l'impact écologique de la filière d'un métal m tout en insistant sur la difficulté de décarboner les métaux aux émissions intenses en carbone. L'existence de données nominales fiables et accessibles dans le secteur des métaux non-ferreux est possible grâce à Shao, Guan, Wan, Chu, & Ju, (2014). En l'absence de données fiables sur les émissions de CO_2 , nous avons appliqué l'approche de France

17. L'utilisation d'une échelle logarithmique rend difficile d'atteindre les premiers comme les derniers niveaux du barème. De fait, l'importance réelle d'un écart est de plus en plus conséquente au fur et à mesure que l'on escalade l'échelle de mesure. Un écart de 0,1 peut se représenter que quelques kilos au départ mais plusieurs milliers de tonnes aux derniers échelons.

18. Cet indicateur ressemble lui aussi à une échelle logarithmique aux échelons : 0,5 ; 1 ; 2 ; 5 ; 7 ; 10 ; 20 ; 100 ; 1000 ; 10 000. Cette échelle créée me semble davantage pertinente pour appréhender les degrés de criticité d'une intensité marginale de carbone. En effet, une échelle logarithmique aurait rendu totalement impossible un indice élevé de criticité à moins de sous-évaluer l'intensité de l'ensemble de métaux en prenant une valeur de départ anormalement basse.

Stratégie (France Stratégie, 2020) (Bueb & To, 2020). Celle-ci consiste à estimer l'intensité carbone du mix énergétique et multiplier celle-ci par la quantité d'énergie nécessaire à la production d'une tonne de métal et par la quantité de métal produite. On trouve ainsi dans un premier temps l'intensité carbone du métal puis la quantité totale de GES émises par l'industrie. Les détails de ces calculs sont disponibles sur demande auprès de l'auteur.

Tableau 1: Sources et leurs utilisations

Sources de données ¹⁹	Utilisation
(Yan, Wang, Cao, Zhang, & Sun, 2021)	DA + IE + RE
(Shao, Guan, Wan, Chu, & Ju, 2014) (Li, Mi, Coffman, & Wei, 2018) (Navarro & Zhao, 2014) (Gao, Fan, Chen, & Dai, 2023) (BRGM, 2020) (Westfall, Davourie, Ali, & McGough, 2016) (Kawajiri, Tahara, & Uemiya, 2022)	Emission CO ₂ par métal
(U.S. Geological Survey, 2023) (U.S. Geological Survey, 2015)	Quantité par métal
(France Stratégie, 2020) (Bueb & To, 2020)	Méthodologie / Intensité énergétique des métaux
(Connaissance Des Energies, 2020)	Unités de conversion
(Ritchie & Roser, 2023) (IEA, Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer, 2021)	Mix énergétique

La formule finale du Risque Environnemental est donc la suivante et combine à la fois la toxicité de la production d'un métal et son impact carbone :

$$ER_m = T_m \left(\frac{Q_{wg.m} + Q_{wl.m} + Q_{ws.m}}{Q_{wg} + Q_{wl} + Q_{ws}} \right) EPI_{CN} EC_m * IC_m$$

19. Les sources non-utilisées lors des calculs mais venues confirmer les chiffres utilisés ne sont pas inscrites dans ce tableau. C'est le cas de (BP, 2022) (BRGM, 2020) (Banque mondiale, 2017) (Commission Européenne, 2023) (GIEC, 2013) (IEA, 2022) (Institute for European Studies, 2019) (McKinsey, 2020) (Vidal, 2018, 2019). Lorsque les chiffres et les ordres de grandeurs différaient, j'ai fait le choix de préférer un chiffre aux autres selon la fiabilité de la source, sa méthodologie et la précision de ses résultats plutôt que de faire la moyenne des données analysées. Cela facilite la reproduction des chiffres avancés dans ce mémoire.

2. Analyse des résultats

Cette partie présente les résultats de la méthodologie développée en première partie. Les résultats de ces équations sont présentés au sein d'une matrice de criticité à deux dimensions. L'axe X indique l'importance économique tandis que l'axe Y indique le risque d'approvisionnement. L'objectif de ce mémoire est de construire une troisième dimension décrivant l'impact environnemental. Cet indice est représenté par la surface des cercles, les métaux aux cercles les plus petits ayant un impact environnemental modeste, tandis que les superficies les plus importantes représentent un risque environnemental accru. Par la suite, nous mettrons en perspective cette approche avec les listes de métaux critiques dressées par différentes régions du monde avant d'estimer différentes évolutions du modèle.

2.1. Analyse de la matrice de criticité chinoise

En accord avec les travaux de (Gloser, Espinoza, Gandenberger, & Faulstich, 2015) et (Erdmann, Behrendt, & Feil, 2011), cette matrice de criticité en deux dimensions a été divisée en 6 sections afin de distinguer les différentes formes de risques que peuvent rencontrer les métaux. La zone n°1 est située en bas à gauche de la matrice et indique un niveau de criticité faible. La seconde partie se situe à droite de la première zone et regroupe les métaux à l'importance économique importante et à la difficulté d'approvisionnement faible. La zone n°3 se situe dans la partie gauche en haut à gauche du graphique. Elle accueille les métaux à la difficulté d'approvisionnement élevée mais à l'importance économique encore modeste. La quatrième partie centrale est une zone dans laquelle les métaux ont une criticité moyenne à la fois par leur importance économique et leur difficulté d'approvisionnement. La cinquième partie forme une zone tampon entre les trois précédentes et la sixième. Elle accueille les métaux à la criticité élevée à la fois en termes d'approvisionnement et d'importance économique. Ces éléments représentent un risque élevé de pénurie et de disruption dans les chaînes d'approvisionnement par manque de substituabilité et doivent donc faire l'objet d'une surveillance intense. Enfin, la sixième est la dernière zone, située en haut à droite de la matrice, regroupe les éléments avec un niveau de criticité maximum. La distinction entre ces différentes parties permet de dégager une typologie plus fine de la criticité des métaux. La dualité manichéenne entre métaux critiques et non-critiques est ainsi nuancée par l'existence de zones tampon.

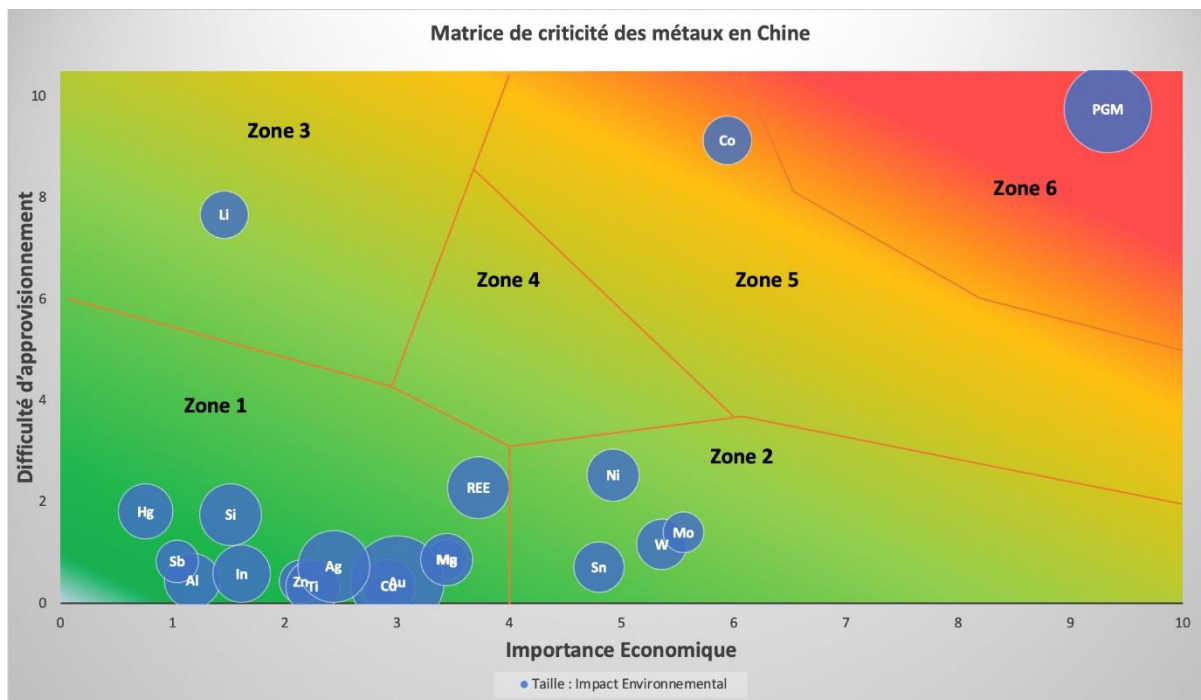


Figure 1 : Matrice de criticité des métaux non-ferreux en Chine

La surface des cercles proportionnels des métaux indique leur impact environnemental.

Source : auteur

La matrice de criticité traduit tout d'abord fidèlement les grandes caractéristiques de l'industrie minière chinoise des métaux non-ferreux. Le pays est un producteur incontournable de nombreux métaux, ce qui lui assure un indice d'approvisionnement modeste pour la plupart des ressources étudiées. C'est le cas du mercure, du silicium, de l'aluminium, de l'indium, du plomb, de l'antimoine, du zinc, de l'or, du cuivre, du manganèse, du magnésium, du titane et de l'argent.

Cette recherche permet néanmoins de distinguer plusieurs métaux au niveau de criticité élevé, à la fois par leur importance économique et leur difficulté d'approvisionnement. Un autre groupe de métaux dispose d'un niveau de criticité suffisant pour s'élever au niveau de la zone tampon, que ce soit pour leur importance économique ou bien leur difficulté d'approvisionnement. En effet, si seule trois métaux posent un problème d'approvisionnement suffisamment important pour représenter une menace sérieuse aux yeux de la Chine, l'importance économique se révèle un critère plus problématique.

Le seul métal présent dans la zone n°6 est le groupe des platinoïdes, PGM, qui inclut le platine, le palladium, l'iridium, le rhodium, le ruthénium ainsi que l'osmium. Cependant,

le platine et le palladium représentent 90 % du groupe des platinoïdes. Ce sont des métaux rares et chers, particulièrement consommés par l'industrie automobile, puisqu'ils composent le moteur des véhicules thermiques. Les différents métaux membres des PGM sont substituables entre eux jusqu'à un certain point mais ne peuvent être substitués par un autre métal d'un autre groupe, ce qui décuple leur importance économique. La Chine produit de faibles quantités de PGM et ses ressources sont aussi pauvres. De fait, elle dépend de ses importations russes, ce qui multiplie son indice de difficulté d'approvisionnement. La transition du secteur automobile vers une mobilité décarbonée et électrique réduira probablement l'hégémonie de ces précieux métaux sur la scène internationale.

Les propriétés magnétiques du cobalt font de la Chine un consommateur friand dans le secteur des superalliages, des aimants mais aussi dans le domaine des batteries de voitures électriques. L'extraordinaire concentration de la production en République démocratique du Congo rend cependant l'approvisionnement de ce métal extrêmement complexe pour la Chine et place le métal dans la zone n°5. Le risque de pénurie ou de rationnement est, à ce titre, particulièrement élevé et empirera avec les conséquences du dérèglement climatique et celles de la transition énergétique.

La difficulté d'approvisionnement représente une barrière conséquente pour un troisième et dernier métal de la liste étudiée : le lithium. Celui-ci a été historiquement utilisé dans l'industrie céramique mais sa capacité de stockage énergétique lui a offert une nouvelle jeunesse dans le domaine des batteries électriques. La croissance de la consommation à l'échelle mondiale est forte et progresse à hauteur de 6 % par an. En revanche, le développement de batteries sans lithium permet de pondérer légèrement l'importance économique croissante que ce métal compte susciter dans les décennies à venir. Son taux de recyclage est nul ou presque, et sa forte concentration dans les sols d'une poignée d'États, particulièrement au Chili, rend son approvisionnement crucial pour la Chine. De fait, le métal se situe dans la zone n°3.

La zone n°2, qui représente la zone tampon à l'importance économique élevée, comprend à elle seule plus d'éléments que toutes les zones évoquées plus haut. On en dénombre quatre : le nickel, le molybdène, le tungstène et l'étain. Le nickel est particulièrement consommé dans la production d'acier inoxydable mais il entre aussi dans la composition d'alliages et des superalliages cruciaux pour des secteurs stratégiques comme la défense. La présence d'une importante production et des réserves importantes en Chine réduit sa difficulté d'approvisionnement d'autant plus que la répartition des réserves est moins concentrée que pour la plupart des métaux.

Sous-produit du minerai de cuivre, le molybdène est principalement produit par la Chine qui dispose des réserves les plus conséquentes, ce qui lui permet d'assurer la pérennité de l'industrie des alliages et de superalliages, premiers consommateurs de molybdène. L'application de ces alliages couvre cependant des secteurs stratégiques ou de première nécessité comme l'armée, la santé ou l'industrie pétrolière. Cela fait de lui un second élément à la valeur économique importante mais pondérée par sa facilité d'approvisionnement aux yeux de Beijing.

Comme pour de nombreux métaux, la Chine contrôle la chaîne d'approvisionnement du tungstène. Son point de fusion très élevé multiplie son utilisation dans des secteurs comme l'industrie minière et pétrolière, l'exploration spatiale ou encore les réacteurs nucléaires, mais aussi dans l'électroménager. Tout cela augmente son importance économique à un niveau qui pourrait être problématique si ce n'est pour son accès sécurisé pour la Chine. Cet élément est bien souvent considéré comme critique dans la liste d'autres pays qui n'ont pas le secteur industriel mature de la Chine. Enfin, l'étain a des applications diverses dans les alliages, la soudure, la plomberie. Ici encore, la Chine assure une chaîne d'approvisionnement stable et fiable tout au long de la chaîne de valeur, ce qui, combiné à des réserves importantes, réduit son risque de pénurie.

En somme, une majorité de métaux ne représentent pas de réelles menaces d'approvisionnement aux yeux de la Chine. Par ses réserves importantes mais surtout par ses investissements stratégiques à l'étranger et ses capacités domestiques de raffinage, la République populaire s'impose comme un acteur incontournable et résilient au long de la chaîne de valeur de l'industrie minière. Seuls trois métaux revêtent une difficulté d'approvisionnement suffisante pour représenter une réelle menace et, lorsque l'on croise cette indicateur avec l'importance économique, le cobalt et les platinoïdes sont les deux éléments véritablement problématiques au regard de la République populaire.

2.2. Impact environnemental : Analyser plus précisément la troisième dimension et l'impact environnemental des métaux non-ferreux

Après avoir analysé la criticité des métaux selon une matrice conventionnelle, nous mettons désormais en perspective l'impact environnemental des métaux à travers une matrice combinant l'importance économique en abscisse et l'impact environnemental en ordonnée (figure 2). Il ne semble pas y avoir de corrélation entre importance économique et impact environnemental. Sur les 20 métaux étudiés, 17 forment un groupe ayant un impact environnemental similaire compris entre 3 et 6 alors même que

leur importance économique diverge grandement, d'un impact économique allant de 0 à 6. De fait, il semble qu'il existe un impact-seuil qu'aucun métal ne dépasse. En l'occurrence, aucun des métaux étudiés ne dispose d'un impact environnemental inférieur à 3. Cela peut être expliqué par la nature polluante de l'industrie minière ou bien par l'aspect logarithmique des outils de mesure ajoutés. En effet, une mesure logarithmique rend les premiers échelons plus faciles à franchir tout en nécessitant un impact bien plus conséquent pour franchir les derniers échelons. L'hypothèse d'une corrélation entre une importance économique forte et un impact écologique fort s'observe empiriquement à travers cette étude. Néanmoins, le faible nombre de métaux s'inscrivant à ce niveau de criticité ne permet pas d'assurer la fiabilité de cette corrélation.

Trois éléments se distinguent au sein du groupe de métaux étudiés : l'or, le groupe des platinoïdes ainsi que l'argent. Tous trois se caractérisent par un impact élevé au sein des trois indices qui composent l'impact environnemental de ce travail. Leur extraction et leur raffinage impliquent le rejet de déchets toxiques ainsi que l'émission d'importantes quantités de gaz à effet de serre du fait d'une intensité carbone très élevée.

Du fait de sa composition, l'indice d'impact environnemental est un agrégat de trois sous-indicateurs : Un indicateur de risque environnemental lié à la toxicité des déchets rejetés, un indicateur des émissions de gaz à effet de serre, ainsi qu'un indicateur de l'intensité carbone marginale des différents métaux. Cela implique qu'il existe différentes manières de polluer. Si certains métaux combinent les trois, d'autres peuvent voir un sous-indicateur être pondéré par les deux autres. Cet effet renforce un peu plus la constitution d'un groupe avec un indicateur global moyen. Dans la réalité, en revanche, une seule valeur élevée pour l'un de ces indicateurs peut représenter un obstacle en soi.

Premièrement, un métal peut avoir un niveau de toxicité élevé indépendamment de son impact climatique. C'est le cas de la production de mercure, qui rejette une quantité importante de déchets toxiques avec un indice de 7,775 alors même que ses émissions carbonées (indice à 4,4) et son intensité carbone (indice à 3) restent faibles. Cette forme de pollution représente une problématique écologique indépendamment d'éventuels gaz à effet de serre.

Deuxièmement, un métal peut avoir un impact climatique fort sans rejeter de déchets particulièrement toxiques ou nécessiter une forte émission de CO₂ pour produire une tonne de métal. Cela implique généralement d'importants volumes de production. Par exemple, l'aluminium est le métal responsable des plus importantes émissions de CO₂ avec un indice de 9,2. Pourtant, son impact environnemental est modéré (5,1) du fait de son faible indice de toxicité (0,125) ou de son intensité carbone (6). C'est le cas car 23 300 000 de tonnes d'aluminium sont produites chaque année en Chine. L'importance de sa décarbonation est ainsi un enjeu crucial de la transition énergétique chinoise, ce que manque de mettre en valeur la méthodologie.

Inversement, un métal comme l'indium peut avoir un indice d'intensité carbone forte (8) mais pondéré par sa faible production (420 tonnes). Un tel métal n'implique pas de pollution élevée mais produirait une forme de verrouillage carbone (Unruh, 2000) si la transition énergétique nécessite une augmentation des échelles de production. En effet, sans réduction de son intensité carbone, une augmentation des volumes de production augmenterait considérablement les émissions de GES et ainsi l'impact environnemental des produits en aval de la chaîne de valeur, tout en réduisant l'effectivité des solutions bas-carbone qui impliqueraient l'utilisation de ce métal.

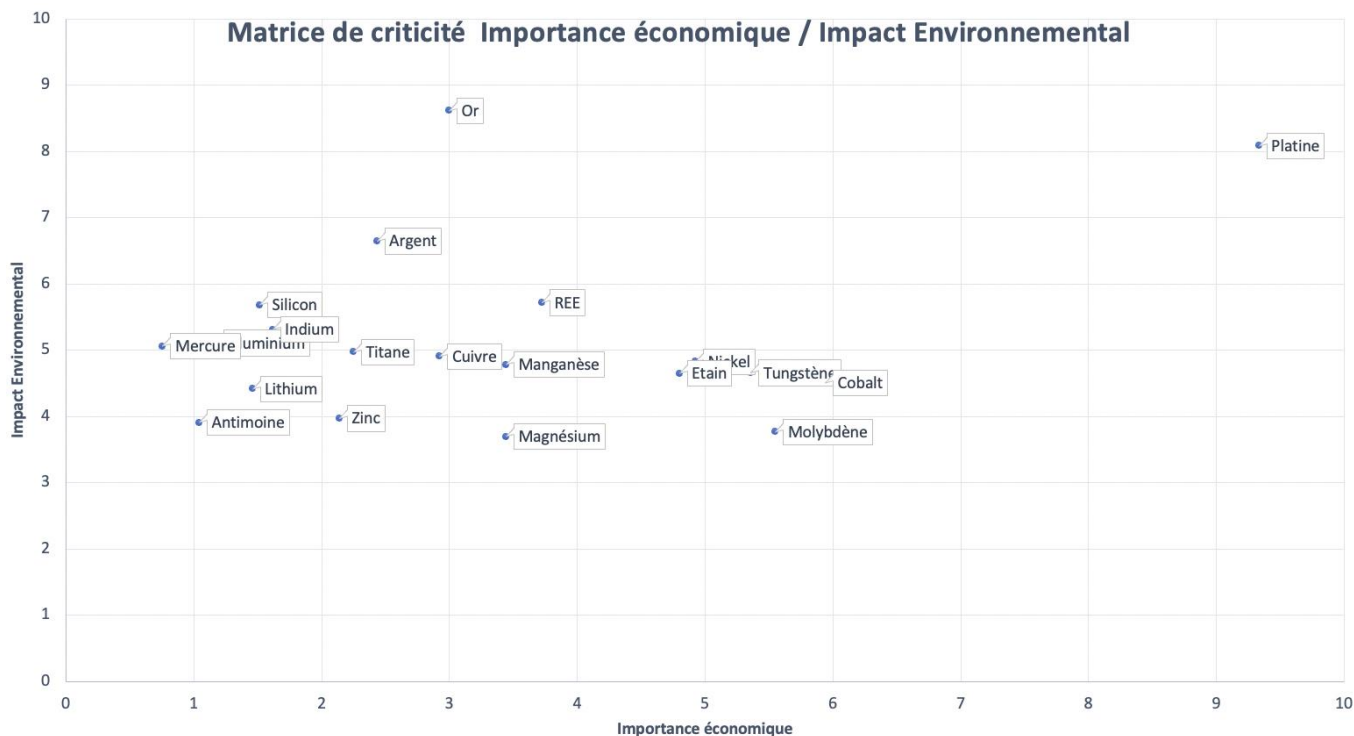


Figure 2 : Matrice de criticité de l'Impact Environnemental sur l'Importance économique des métaux non-ferreux en Chine

Source : auteur

2.3. Une perspective en temps et en lieu : comparaison internationale et projection du modèle

Jusqu'à présent, le modèle d'évaluation de la criticité des métaux est figé en un instant et un lieu donné. À cet égard, ma méthodologie d'analyse semble statique et peine à réaliser ce pour quoi elle a été conçue. En effet, le niveau de criticité d'un métal est subjectif et dépend des ressources propres à un acteur spécifique. Pour autant, il peut être intéressant de croiser l'analyse des principaux pays impliqués. Cette perspective nous permet alors de synthétiser les relations de dépendance et interdépendance entre les différentes régions du monde. De plus, la criticité cherche à évaluer un risque futur lié à un métal trop important pour l'économie d'un pays, trop destructeur pour l'environnement ou dont l'approvisionnement est trop difficile. Le modèle cherche donc à prédire ce risque sans pour autant considérer les potentiels changements à venir concernant l'une ou l'autre de ces variables. En impliquant une comparaison

internationale et les différentes dynamiques qui sont susceptibles de modifier le modèle avec le temps, j'entends affiner et compléter certaines lacunes du modèle de criticité et ainsi répondre un peu mieux à notre première problématique et dresser une liste des métaux considérés comme critiques par la Chine.

2.3.1 Comparaison internationale : l'hégémonie chinoise sur le marché des métaux

La puissance de l'industrie minière chinoise réduit considérablement la vulnérabilité de son économie à une disruption de l'approvisionnement en provenance d'une puissance étrangère. Nous l'avons vu, trois métaux représentent un risque d'approvisionnement critique et capable d'impacter significativement la Chine. Il s'agit principalement du cobalt produit au Congo ainsi que du groupe des platinoïdes provenant d'Afrique du Sud et de Russie. De fait, la Chine ne dépend d'aucune puissance rivale dans son approvisionnement en métaux non-ferreux. C'est d'autant plus le cas que ses deux principales vulnérabilités sont partagées avec les autres principales puissances industrielles de la planète. Inversement, le Japon, l'Union européenne et les États-Unis subissent une dépendance importante sur une diversité de métaux et de matières premières. Sur les 18 métaux critiques aux puissances industrielles, 11 (soit 61 %) sont produits majoritairement par la Chine. Cette liste s'agrandit encore lorsque l'on rentre dans les spécificités propres à chaque pays. En contrôlant l'approvisionnement en métaux des puissances occidentales et japonaise, la Chine dispose d'un levier politique puissant à leur encontre.

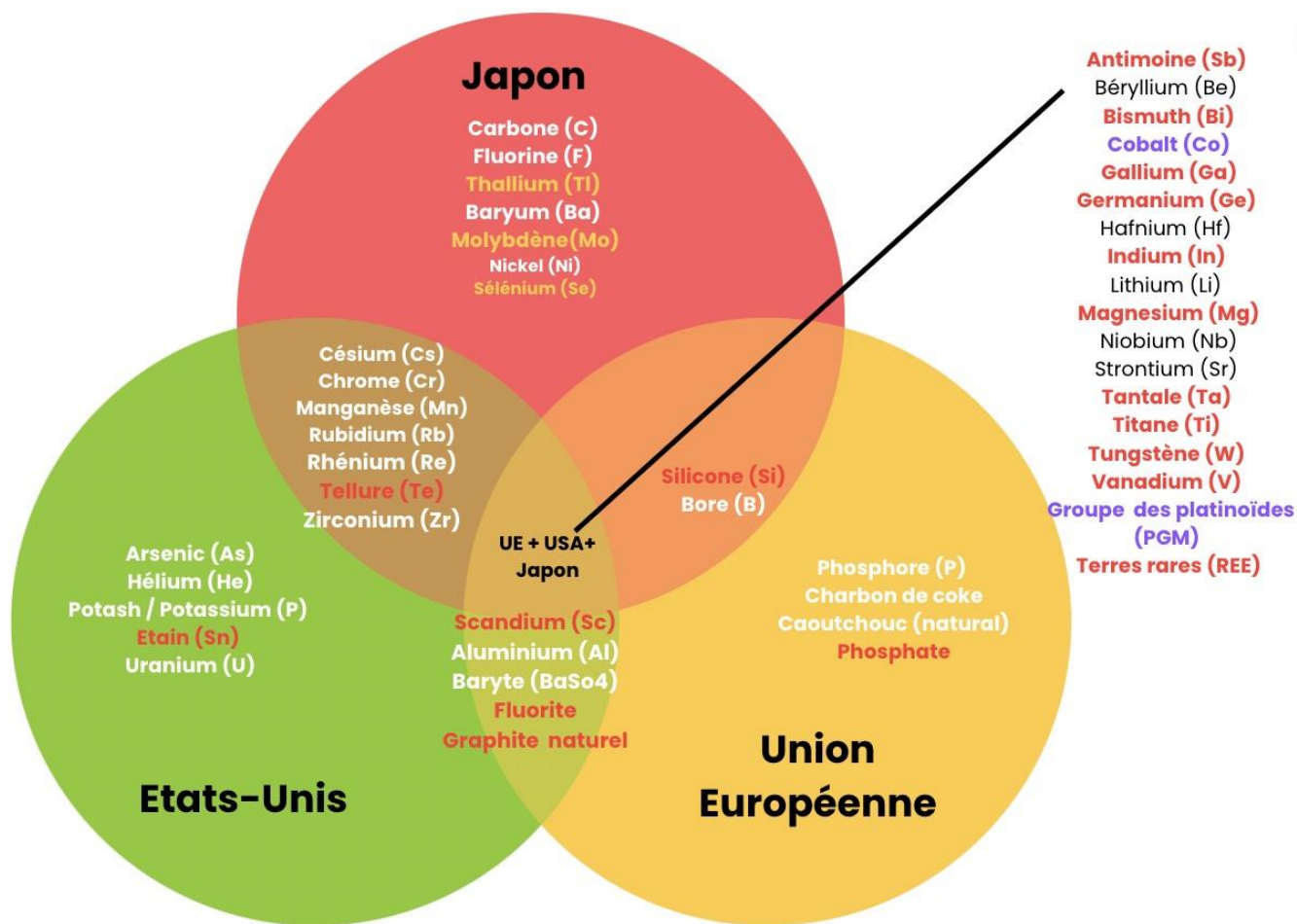


Figure 3: Comparaison des métaux considérés comme critiques par différentes puissances

Source : Nakano, 2022 ; U.S. Geological Survey, 2023

Les éléments de couleur rouge sont des métaux critiques dont le producteur principal est la Chine. Les éléments violets représentent les métaux eux-mêmes critiques pour la Chine

Au-delà de la simple production primaire de métaux, la Chine impose sa puissance par ses capacités de raffinage. Elle dispose de 72 % des capacités mondiales de raffinage du cobalt, 60 % du lithium, 97 % des terres rares. Plus en aval de la chaîne de valeur, la Chine contrôle 90 % des capacités de production des *wafer*²⁰ qui composent les panneaux photovoltaïques modernes mais aussi d'une majorité des capacités de

20. Un *wafer* désigne une fine tranche d'un matériau semi-conducteur comme le silicium. Il rentre dans la composition d'un panneau photovoltaïque.

production d'éoliennes. De ce fait, la part de la Chine dans la production de technologies renouvelables ne diminue pas au long de la chaîne de valeur, bien au contraire elle renforce sur certaines de ces étapes ses parts de marché. Par exemple, la Chine représente 32 % de l'extraction mondiale des métaux nécessaires à la construction de batteries électriques, cette part passe à 52 % pour le raffinage et la construction d'objets semi-finis pour atteindre 66 % de l'assemblage de batteries lithium-ion. Dans le cas des panneaux photovoltaïques, la Chine n'extrait « que » 53 % des métaux nécessaires à leur production mais fabrique 80 % des composants semi-finis (dont les wafers) avant de réduire légèrement sa part à 70 % lors de l'assemblage des panneaux. Enfin, dans le cas des éoliennes, la Chine extrait 54 % des métaux nécessaires et n'assemble que 23 % des turbines. Néanmoins, son contrôle monte à 56 % du marché mondial pour la fabrication de composants semi-finis. C'est donc en s'inscrivant comme un acteur incontournable à au moins une étape de la chaîne de production d'une technologie que la Chine profite d'un levier géopolitique et géoéconomique puissant. C'est d'autant plus le cas qu'une fois cet avantage acquis, la Chine met cet atout à profit pour renforcer sa position à d'autres étapes de la chaîne de valeur.

2.3.2 Projections dans le temps, un modèle en proie à des dynamiques contraires

L'évolution des émissions carbone du secteur minier chinois est soumise à des forces contradictoires, certaines agissent en faveur d'une décarbonation tandis que d'autres viennent nuancer ces avancées. Ces deux projections ont souvent donné naissance à des projections positives et négatives des stocks de ressources présents sur notre planète (Vidal, 2019).

L'industrialisation de certains pays fortement peuplés entraînera mécaniquement une augmentation de la consommation de matières premières. Celle-ci se divise généralement en une phase de développement d'infrastructures et des industries lourdes, gourmandes en métaux basiques (acier, cuivre, aluminium...) suivie d'une seconde phase d'évolution vers des technologies de pointe. Ces nouvelles innovations profitent des différentes propriétés chimiques des éléments. De fait, le tableau périodique des éléments est aujourd'hui presque entièrement utilisé afin d'optimiser les performances de nos technologies de dernière génération. La demande future en ressources minérales peut être basée sur le rythme de construction et de remplacement des technologies qui prend en compte la durée de vie des biens, leur consommation de métaux, leur taux de recyclage. Elle demeure pourtant difficile à prédire puisqu'en réponse à de potentielles ruptures d'approvisionnement, les entreprises et les États accordent une part croissante de leurs efforts en Recherche et

Développement (R&D) et cherchent à renforcer la substituabilité ou le taux de recyclage de certaines technologies. Les résultats de ces recherches auront de profondes implications sur l'évolution de la demande de métaux à l'avenir (Vidal, 2020).

En modélisant cette approche, le rapport du club de Rome sur les limites de la croissance affirmait que la croissance éternelle était impossible. L'épuisement des ressources lié à leur exploitation croissante conduirait invariablement à des pénuries. Cela est lié à la déconcentration des taux de métaux dans les roches. Dans un modèle capitaliste, les sites aux conditions d'accès les plus aisées et aux concentrations les plus fortes attireront les premiers investissements au détriment de sites moins rentables. À mesure que les premiers sites s'épuisent, d'autres investissements sont réalisés pour compenser cette déchéance en exploitant d'autres sites. S'il existe un stock fini d'une ressource sur Terre, il en résulte un moment où l'ouverture de nouvelles mines ne compensera pas la fermeture des précédentes. Cette logique inspire à Hubbert l'avènement d'un pic pétrolier, rapidement élargi à un pic des matières premières non-renouvelables (Hubbert, 1956). Pour autant, ces prédictions n'ont, jusqu'à présent, pas été vérifiées par de véritables contraintes sur l'approvisionnement et les réserves de métaux n'ont jamais été historiquement aussi élevées qu'à l'heure actuelle. Les critiques arguent à cet égard que le progrès technologique élargit toujours plus les ressources et les réserves contemporaines en rendant accessible puis viable l'exploitation de sites qui, jusque-là, ne l'étaient pas (Vidal, 2018). Pourtant, l'ampleur de la consommation de métaux nécessaires à la transition énergétique laisse craindre l'épuisement de certains d'entre eux. En effet, les scénarios d'une transition écologique limitant le réchauffement climatique à 1.5°C nécessiterait autant de métaux que ce que l'humanité a jusqu'ici extrait (Stéphane, 2023). Certaines technologies « vertes » peuvent représenter jusqu'à 90% de la demande cumulée de tellure ou encore 70% du dysprosium (Valero, Valero, Calvo, & Ortego, 2018). Cette dynamique mondiale risque d'affecter la Chine qui est le premier marché des technologies renouvelables gourmandes en métaux non-ferreux (principalement des véhicules électriques, des panneaux photovoltaïques et des éoliennes). Le respect de ses engagements internationaux en matière de climat (atteindre le pic des émissions carbone avant 2030 et la neutralité carbone en 2060) nécessitera un déploiement important de ces technologies (Sandalow, et al., 2022). Le détail de ces statistiques est décrit dans les graphiques 4 et 5.

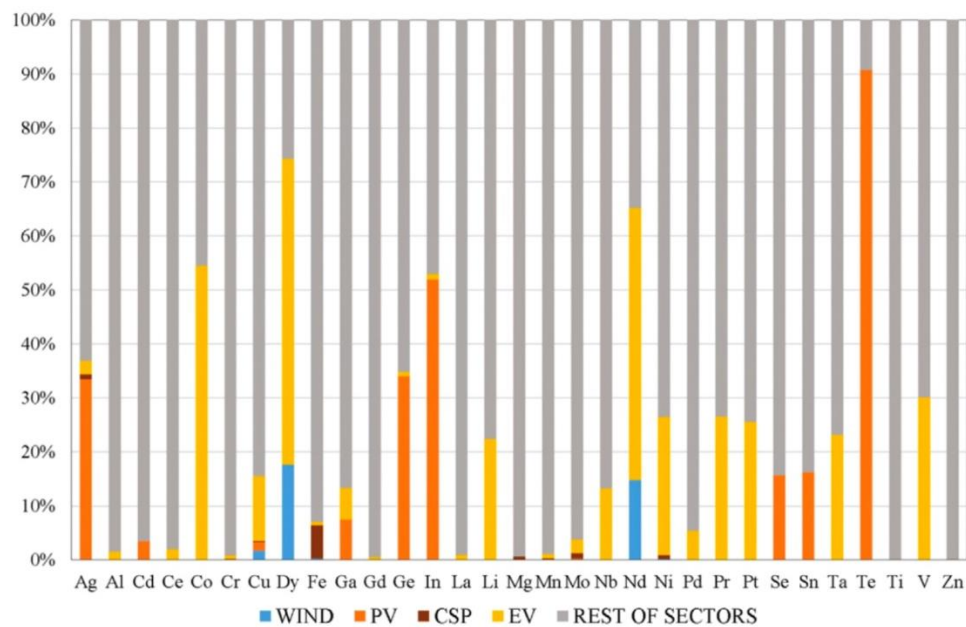


Figure 4 : Parts de la demande cumulée de 2016 à 2050 par métal et type de technologie

Source : (Valero, Valero, Calvo, & Ortego, 2018)

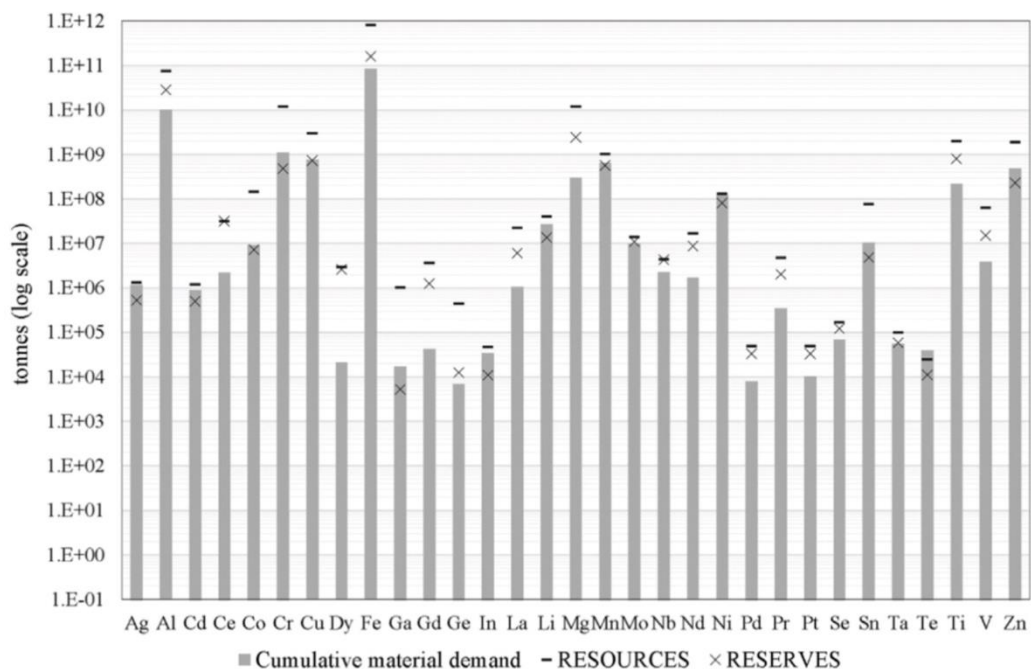


Figure 5: Analyse comparée de la demande cumulée entre 2016 et 2050 par métal avec leurs ressources et leurs réserves

Source : (Valero, Valero, Calvo, & Ortego, 2018)

L'exploitation minière des ressources naturelles est très énergivore et représente 12 % de la consommation mondiale d'énergie. Le prix de cette énergie est l'un des principaux éléments qui composent le prix de la production de métaux. Or, la quantité d'énergie à déployer pour extraire un métal de la roche est fortement liée à la concentration dudit métal dans la roche. Elle est en réalité régie, toutes choses égales par ailleurs, par une loi puissance (au carré : « x^2 ») de la dissolution (l'inverse de la concentration). Cela signifie que la puissance énergétique engagée sera inversement exponentielle à la présence du métal au sein du gisement. Ici encore, l'amélioration technologique (gain de 2 % par an au XX^e siècle) compense largement cette dissolution croissante (1,5 % par an sur la même période). À ce titre, la détérioration des teneurs en cuivre suggère que la production de cuivre en 2050 nécessitera 7 fois plus d'énergie qu'en 2020 (Lee J. , *et al.*, 2020). On observe cependant un affaiblissement de cette amélioration technologique avec le temps, alors même que la quantité d'énergie nécessaire poursuit sa trajectoire exponentielle. Il existe donc un point critique à partir duquel le prix de production augmentera tendanciellement car les gains à l'innovation ne parviendront plus à compenser les pertes liées à la dissolution. Ce point est d'autant plus proche que les gains technologiques font face à la barrière physique des lois de la thermodynamique. Celle-ci correspond, par exemple, à la quantité minimale d'énergie nécessaire pour séparer un atome d'aluminium de la roche qui l'entrave (10 kWh/kg pour l'aluminium).

Face à ces contraintes géologiques, le recyclage a un rôle clé à jouer. S'il est impossible de recycler à 100 % les métaux issus de notre industrie, il est possible que le recyclage devienne la première source de matière première. Néanmoins, la première contrainte au recyclage est davantage économique, les coûts du recyclage étant pour l'essentiel plus élevés, il faudra attendre une baisse de la compétitivité des méthodes d'extraction ou des gains de productivité des techniques de recyclage pour que ces dernières s'imposent sur le marché (Vidal, 2018).

Il existe aussi une puissante boucle de rétroaction dans la chaîne de valeur des énergies renouvelables. En effet, les métaux qui composent les technologies vertes nécessitent, pour être durables, une énergie compétitive, bas carbone et abondante. Si le prix de l'énergie est trop élevé, le coût de production des métaux augmente, ce qui entraîne une hausse des coûts de production des énergies renouvelables en amont. Ceux-ci augmenteront à leur tour le coût final de l'électricité qui, pour finir, augmentera le coût des métaux etc. Une boucle de rétroaction similaire est perceptible en termes d'impact carbone. Par la consommation intensive d'énergie lors du processus de production et de raffinage des métaux, l'intensité carbone du mix énergétique joue un

rôle important dans l'impact carbone de la filière minière. Or, les métaux sont des composants incontournables des éoliennes et panneaux photovoltaïques, et une réduction de leur intensité carbone entraîne mécaniquement une réduction de l'intensité carbone de l'énergie qui en résulte.

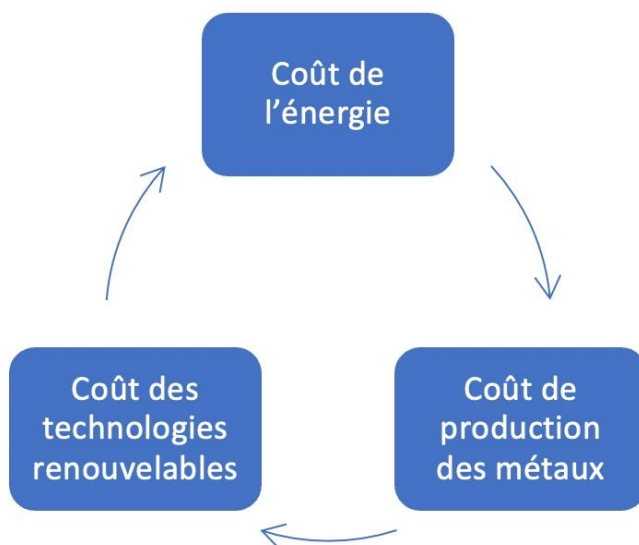


Figure 6: Boucle de rétroaction Energie-Métaux-Technologie

Source : auteur

Considérant cela, la criticité des métaux en Chine peut évoluer de plusieurs manières à l'avenir. Il est fort probable que la tendance de long terme accroisse l'importance économique des métaux utilisés dans les secteurs clés ou stratégiques comme la défense, la transition énergétique ou les nouvelles technologies de la communication. La croissance importante que l'on peut attendre de ces secteurs risque d'influer fortement sur la consommation de certains métaux et donc sur l'ampleur des conséquences en cas de rupture d'approvisionnement. À l'inverse, les « métaux de base » (大宗矿产 *dà zōng kuàng chǎn*) aujourd'hui considérés comme stratégiques, verront probablement leur importance économique diminuer lorsque les secteurs porteurs de leur consommation, dont le bâtiment et la construction, cesseront leur expansion rapide. Venu soutenir une urbanisation galopante et le logement d'une démographie en pleine croissance, le secteur du bâtiment chinois a été fortement stimulé dans les dernières décennies. Une fois cette période de transition vers un mode de vie urbanisé et tertiairisé réalisée, le secteur de la construction devrait progressivement ralentir, et avec lui, sa consommation en métaux de base. Un contre-

élément vient cependant nuancer cette tendance : la reconstruction et le déplacement des infrastructures impactées par le dérèglement climatique qui pourraient renforcer la demande de ces métaux.

À mesure que ses réserves se déprécient, la sécurité d'approvisionnement de la Chine peut se trouver compromise. Si la Chine cherche désormais à diversifier ses approvisionnements pour ne plus reposer uniquement sur la richesse de ses sols, cela renforce mécaniquement le risque d'approvisionnement que la République populaire est prête à prendre. Sa capacité à augmenter les taux de recyclages à des prix viables pèse conséquemment sur sa capacité à réduire sa dépendance aux importations étrangères. Sur la plupart des métaux considérés dans cette étude, les risques de ruptures d'approvisionnement aux conséquences lourdes pour l'économie chinoise restent ainsi faibles à moyen-terme.

En Chine, l'impact environnemental des métaux non-ferreux diminuera probablement à l'avenir à mesure que les nouvelles technologies et cadres de régulation environnementales limitent les déboires passés de l'industrie minière. Si certains métaux peuvent voir exploser leur consommation en valeurs absolues, l'efficacité technologique et la décarbonation du mix énergétique compenseront probablement une partie de cette réduction. Enfin, la délocalisation de la pollution par l'internationalisation de la filière minière chinoise produit artificiellement une réduction chinoise au détriment des pays hôtes. Si la pollution ne diminue pas à l'échelle globale, elle se concentrera davantage dans les pays d'accueil²¹.

Nous l'avons vu, la situation politique minière de la Chine se distingue par une large domination des parts du marché de nombreux métaux non-ferreux. Contrairement à ses rivaux directs, la Chine n'est dépendante du marché mondial que pour deux groupes de métaux seulement. Ces mêmes métaux sont par ailleurs importés de pays tiers et non des États-Unis, de l'Union européenne et du Japon qui en sont eux-mêmes dépendants. Cette résilience du marché chinois lui assure une place de choix dans la course aux technologies renouvelables.

21. Cette réflexion n'est pas valable pour les émissions de GES directement responsables du dérèglement climatique dont les conséquences sont globales et ne dépendent pas du lieu d'émission.

3. Une approche stratégique des métaux critiques

Bien qu'elle propose un nouveau regard sur la situation, l'approche de la criticité des métaux n'est pas celle privilégiée en Chine. En effet, une telle analyse aboutit sur un faible nombre de métaux critiques, cohérent avec la situation monopolistique chinoise mais qui reflète mal son instrumentalisation par le pouvoir central. Les experts de Beijing préfèrent dès lors des notions connexes comme celle de « dimension stratégique » (Andersson, 2020). Cette approche revêt un aspect beaucoup plus géoéconomique et géopolitique. Nous cherchons à présent à montrer comment la politique économique et environnementale du gouvernement chinois s'est mise au service de la prospérité et du développement du secteur minier. Une fois cet avantage sectoriel acquis, il a été utilisé à des fins économiques pour séduire des capitaux étrangers et stimuler les industries locales en aval de la chaîne de valeur, mais aussi à des fins politiques lorsque les métaux sont utilisés comme moyen de pression sur une puissance étrangère.

3.1 L'industrie des métaux non-ferreux sur le modèle du vol d'oies sauvages

3.1.1 Évolution de la politique chinoise

Historiquement, la Chine ne suit une réelle politique industrielle que depuis les réformes de Deng Xiaoping (邓小平 *Dèng Xiǎopíng*) et ses successeurs qui donnent naissance à une explosion industrielle. Celle-ci débute en 1975 avec la création du bureau des terres rares²² qui favorise l'émergence de cette nouvelle industrie chinoise. La stratégie mise en place est celle du « vol d'oies sauvages » ou « d'industrie industrialisante » (Bénichi, 2010 ; Kim & Vogel, 2011 ; Vogel, 2013). Cette théorie développée par Kaname Akamatsu décrit la trajectoire économique de l'Asie du Sud-Est qui débuta au Japon. Au fur et à mesure que ce dernier s'industrialise, il délocalise ses industries à la plus faible valeur ajoutée aux pays voisins. Les pays comparativement moins développés se spécialisent alors dans ces industries afin de devenir exportateurs et dégager des revenus qu'ils peuvent alors investir dans des produits à plus forte

22. Autrement appelé le *National Rare Earth Development and Application Leading Group*. Il regroupe différentes institutions au sein du gouvernement central. Le bureau est sous les ordres directs du Conseil d'État avant d'être confié en 1995 à la Commission d'État à la planification du développement qui change de nom en 2003 pour la Commission de réforme et de développement national. En 2008, la branche de régulation de l'industrie se sépare pour former le ministère de l'Industrie et des technologies de l'Information. Le Bureau des Terres rares joint ce ministère à cette époque. Son objectif principal est de réguler le secteur des terres rares et coordonner les différents ministères qui l'encadrent.

valeur ajoutée au détriment des industries les moins rentables qui émigrent vers de nouveaux pays. La Chine fait partie de la troisième rangée d'oies sauvages. Son industrialisation passe par la captation de technologies étrangères qui renforceront sa productivité pour la rendre, à terme, concurrentielle sur les marchés internationaux.

Décriée pour la dangerosité de ses mines, la Chine est le pays qui en accueille le plus sur son sol. En l'espace de 10 ans, de 2004 à 2015, la consommation chinoise de terres rares augmente de 15 % par an, alors même que la consommation du reste du monde diminue de 3,8 % annuellement. Cette évolution implique une plus grande concentration de l'industrie minière entre les mains du pays mais aussi une augmentation du risque d'approvisionnement. En effet, pour certains auteurs, cette tendance aboutit à une consommation domestique de la production chinoise de 80 % voire 110 %. Cela signifie que la Chine est désormais importatrice nette de terres rares et consomme parfois plus qu'elle ne produit. L'émergence à une vitesse presque irréaliste de cet écosystème industriel est l'aboutissement des politiques gouvernementales de quotas à la production, à l'exportation et d'une allocation stratégique des investissements entrants. Cela aboutit à une différence du prix des métaux sur les marchés internationaux et le marché chinois, le prix du premier est, en octobre 2011, deux fois plus élevé que sur le second marché. Cette distinction entre les prix frôle les 1400 % en mars 2011. Une telle différence encourage les entreprises à s'installer en Chine pour profiter des matières premières à plus faible coût (Shen, Moomy, & Eggert, 2020). Cette dynamique est décrite lors d'un entretien avec Roderick Eggert :

« Le gouvernement chinois s'est, depuis des décennies, engagé dans une intégration en aval plus poussée. Ils se sont intéressés à la fabrication, d'abord du métal plutôt qu'à l'exploitation minière des ressources minérales. Ensuite, non seulement la fabrication des métaux, mais aussi des produits qui utilisent ces métaux, notamment les aimants, et ensuite les instruments qui utilisent ces aimants. C'est désormais leur force, même s'ils sont maintenant importateurs des concentrés de terres rares. » (Eggert, 2023)²³

23. La citation originale est la suivante : « The Chinese government has been, for decades moving further downstream. They have been interested in the manufacturing, first of the metal as opposed to the mining of the mineral resource. And then not only the manufacturing of the metals but the products that use the metals, towards magnets, and then the instruments that use the magnets. And it's now their strength even though they now import rare earth concentrates. ». Traduction libre.

3.1.2 *Concentrer pour mieux régner, la naissance des grands groupes miniers chinois*

Dans un article publié en 2016, Ruet décrit aussi un évènement analogue. Pour avoir accès aux capitaux de la mondialisation, les entreprises minières publiques provinciales ont dû passer par des consortiums créés par le Parti central. Ceux-ci disposent du monopole d'accès aux investissements étrangers et ont fini par capter les cadres les plus compétents et les technologies les plus modernes. Ces coquilles à l'origine creuses ont ainsi absorbé leurs alter-ego provinciales pour former les géants miniers actuels (Chinalco ; Minmetal...). Ces entreprises, souvent publiques, sont loyales au pouvoir central (Ruet, 2016). Le marché des terres rares fait figure d'exception et se partage entre six groupes qui disposent de l'écrasante majorité des quotas et de la production domestique. Il s'agit de la China Minemetals Corporation (Beijing); Aluminium Corporation of China Limited (Beijing); China Northern Rare Earth High-Tech Limited (Mongolie intérieure) Xiamen Tungsten Corporation (Fujian); China Southern Rare Earth Group (Jiangxi); Guangdong Rare Earth Industry Group (Guangdong). Cette politique controversée a longtemps été victime des oppositions locales qui refusaient de concéder le contrôle de leurs mines à des entreprises venues d'autres régions. En effet, la fiscalité chinoise alloue la taxe sur les revenus d'une entreprise au gouvernement où se situe le siège social de l'entreprise, ce qui incite logiquement les gouvernements locaux à confier les projets à leurs propres entreprises régionales au risque de perdre une source importante de revenus. Les gouvernements locaux forment alors un « parapluie coopératif » face aux injonctions du gouvernement central²⁴. Pourtant, cette stratégie de concentration des acteurs qui échoua en 2002, porte ses fruits et réduit le nombre de compagnies minières de 165 à 20 en l'espace de cinq ans (Park & Jung, 2015). Ces six entreprises se partagent 90 % des quotas de production, 22/23 mines et 54/59 des sites de raffinage des terres rares (Mancheri, Sprecher, Bailey, Ge, & Tukker, 2019).

En parallèle, le gouvernement désire améliorer et optimiser les performances économiques et écologiques du secteur. Les entreprises respectent désormais des normes d'émission de polluants, des normes d'intensité énergétique marginales, et des standards d'exploitation rigoureux qui limitent l'impact environnemental de la criticité de ces métaux. Cette vision est portée par le « Plan sur les ressources minières nationales »

24. Dans la critique de son propre Léviathan étatique, Hobbes critique la rationalité supposée de l'État et de son administration dans son ouvrage *Béhémot*. Le Léviathan y est alors enjeu de luttes intestines, d'ambitions personnelles et d'égo déplacés (Hobbes, 1889 & 2000). Cette critique s'applique à un État autoritaire chinois souvent décrit comme uniforme, rationnel, moderne et hiérarchique. Bien loin de cet idéal type, la République populaire de Chine fait l'objet de guerres de chapelles, d'ambitions et de politiques distinctes voire contradictoires.

de 2016 à 2020 dont l'objectif est d'assurer un approvisionnement fiable, viable et durable en métaux non-ferreux (Shen, Moomy, & Eggert, 2020). Pour cela, le gouvernement central chinois concentre une part grandissante du marché entre les mains d'un petit nombre d'entreprises. Alors que leur nombre chute rapidement, le pouvoir central accorde des privilèges et réduit les barrières administratives aux entreprises nationales sur lesquelles il dispose d'un plus grand contrôle. (Andersson, Zeuthen, & Kalvig, 2018). En 2021, la Chine poursuit cette concentration de l'industrie minière en regroupant par décret les trois premiers producteurs chinois de terres rares. Ce conglomérat nommé China Rare Earth Group est sous la tutelle de la Commission Chinoise d'Administration et de Supervision des Actifs Publics et devient le premier producteur mondial de terres rares avec 62 % de la production chinoise. Cette concentration du secteur par une intervention du pouvoir politique est une caractéristique majeure du modèle chinois du XXI^e siècle et forme l'ossature de la stratégie du gouvernement.

3.2. Pollutions et enjeux écologiques du secteur minier chinois : de l'impuissance d'une filière à la « civilisation écologique »

Lorsqu'un rapport-clé des Nations-Unies pointe le rôle du dumping environnemental dans l'émergence du secteur minier chinois, le lien étroit entre politique environnementale et politique industrielle est placé sous les projecteurs. La préservation de l'environnement n'est pas seulement une contrainte, mais aussi une arme législative dans la concurrence économique entre les États. Préserver l'environnement stimule en effet la demande de métaux pour répondre aux besoins de décarbonations mais les standards et les règles fixés sont autant d'éléments décisifs de la compétitivité de l'industrie minière elle-même très polluante. Si elle a historiquement sacrifié ses écosystèmes au profit de sa croissance économique, le premier mandat du Président Xi Jinping (习近平 *Xí Jìnpíng*) marque un tournant vers l'aspiration du pays-continent à une « civilisation écologique » soucieuse de l'environnement (International Resource Panel, 2020).

3.2.1 Les différents types de pollution liés à l'industrie minière

Une erreur fréquente en matière de politique environnementale est la perception de la pollution comme un phénomène unique. En réalité, il existe différentes variétés de pollutions. La pollution désigne la destruction ou la dégradation d'un écosystème par l'introduction d'une entité qui perturbe le fonctionnement normal de l'écosystème. Elle peut prendre la forme d'une pollution sonore, lumineuse, chimique ou thermique, ou bien être qualifiée en fonction du lieu qu'elle affecte comme la pollution de l'air, de l'atmosphère, des sols ou de l'eau. Ces pollutions sont bien souvent interconnectées,

peuvent provenir d'une même source et se renforcer mutuellement en démultipliant leurs impacts négatifs respectifs. Le secteur minier est généralement une filière très polluante qui produit divers types de pollutions. La méthodologie développée en première partie considérait la pollution des sols, de l'air et de l'eau mais aussi les émissions de gaz à effet de serre, pour autant le secteur minier est également responsable de pollutions sonores et thermiques difficilement chiffrables.

Le secteur minier et l'industrie lourde en aval de la mine sont invariablement des secteurs parmi les plus polluants qui existent à ce jour. Pour produire 1 tonne d'oxyde de terres rares, 1000 tonnes d'eau polluées sont rejetées ainsi que 2000 tonnes de débris. Le raffinage et le traitement de certains métaux au mercure peuvent produire jusqu'à 1,4 tonne de déchets radioactifs. Les quelques dix milles mines éparpillées sur le sol chinois ont une histoire de désastres environnementaux à leur actif. En 2006, le fleuve Xiang qui passe par la province du Hunan est pollué par les déchets chimiques des mines d'Indium de la région. En 2011, c'est au tour du fleuve Ting dans la province du Fujian qui est sali par les rejets du gallium à l'instar du Ganzhou par le tungstène (Pitron, 2021).

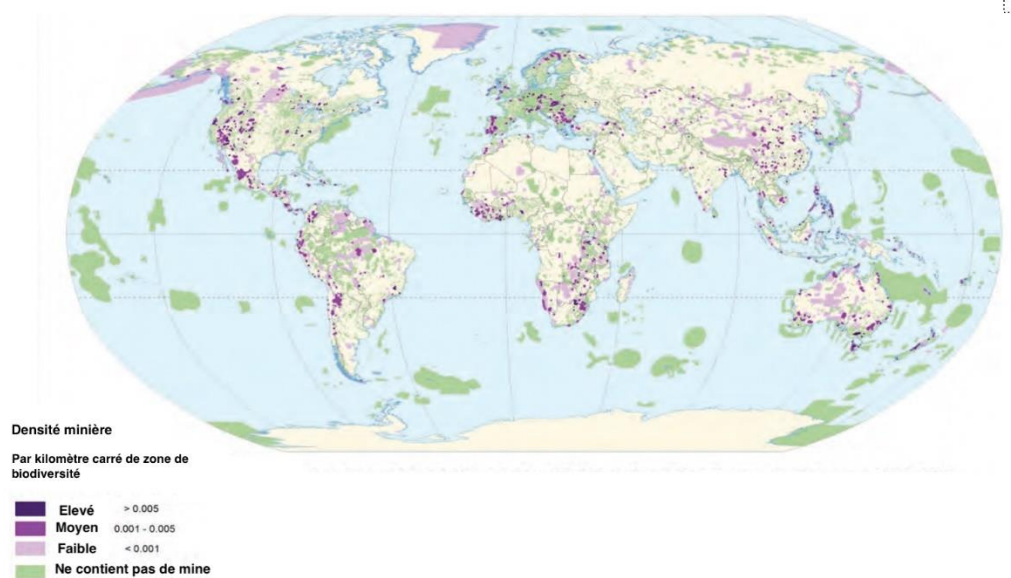


Figure 7: Mappemonde des réserves importantes de biodiversité contenant des mines

Source : International Resource Panel, 2020 ; Sonter, Dade, Watson, & Valenta, 2020.

La pollution de l'air n'est pas épargnée avec l'émission de milliers de mètres cubes de sulfures dans l'atmosphère. Il est aussi important de considérer les émissions indirectes d'un secteur minier gourmand en énergie dont la production-même pollue lorsqu'elle est issue d'énergie fossiles (Mancheri, Sprecher, Bailey, Ge, & Tukker, 2019). Plus conjoncturellement, l'impact environnemental des pollutions minières varie selon le lieu où elles évoluent et l'importance d'une biodiversité dans ses alentours. Or, la Chine est l'un des pays où la corrélation entre les zones à forte biodiversité et la présence de mines est la plus élevée. Cet élément décuple les conséquences néfastes du secteur minier chinois et l'importance d'une réglementation claire et forte.

Ces pollutions peuvent aussi avoir de lourdes conséquences économiques. C'est le cas au début des années 2010, la région du Ganzhou mobilise 5,8 milliards de dollars en réclamations territoriales alors même que les profits tirés par les autorités communales du secteur minier sont de 800 millions. Les conséquences peuvent aussi être sociales et médicales en affectant directement ou indirectement les populations locales. Une pollution peut en effet directement toucher les habitants d'une région ou bien indirectement en détruisant un écosystème nécessaire au développement durable de ces communautés. Ainsi, l'existence d'un continuum entre l'environnement et les sociétés humaines nécessite que ces dernières encadrent leurs émissions polluantes et préservent leur écosystème, nécessaire à leur prospérité future.

3.2.2 La « civilisation écologique », un idéal pour le gouvernement chinois

Xi Jinping insiste fréquemment sur l'importance, pour une Chine étouffée par la pollution, de devenir une « civilisation écologique » (生态文明 *Shēngtài wénmíng*) (René, 2019). Ce concept théorisé par les intellectuels chinois dans les années 1980 a été intronisé par Hu Jintao dans un discours de 2007 avant de devenir un principe constitutionnel en 2018 sous Xi Jinping. Il fait office d'alternative au principe de développement durable ou de « sustainability » anglo-saxon (René, 2019). Dès son arrivée au pouvoir, Xi Jinping multiplie les promesses et les phrases choc. En octobre 2017 à l'occasion du XIX^e Congrès du Parti, le Président chinois parle de « guerre contre la pollution » et opère une synthèse entre stabilité politique et écologique au travers de son concept de « sécurité écologique » (Clément, 2021). De la même manière, il lie intimement les questions économiques et écologiques par la phrase : « *Les fleuves verts et les montagnes vertes sont des montagnes d'or et d'argent* » (绿水青山就是金山银山 *lǜ shuǐ qīng shān jiù shì jīn shān yín shān*). Xi entend par là que la nature est une richesse en soi et que la croissance économique ne pourra se faire au prix de l'environnement (Y. Liu, 2020). De fait, le Président chinois a formulé des objectifs

écologiques forts. La Chine projette d'atteindre son pic d'émissions de CO₂ en 2030 ainsi que la neutralité carbone d'ici à 2060 (IEA, 2023). À partir de la décennie 2010, la puissance législative chinoise encadre progressivement la pollution minière. Cela commence avec la loi sur la protection de l'environnement, complétée en 2013 par une loi sur la régulation de la pollution de l'air. L'objectif est de réduire les émissions et de fixer des standards de protection en promouvant des technologies vertes et une énergie plus propre. Les standards de la « mine verte » instaurent des minimums sociaux, environnementaux, énergétiques. En 2015 puis 2016 sont respectivement implémentés les cadres de la régulation sur la pollution des eaux puis des sols. Enfin, en 2018 est votée la loi pour une taxe de protection environnementale, ainsi que des subventions aux entreprises minières les plus vertueuses selon les standards nationaux (International Resource Panel, 2020).

Comme dans le modèle du vol d'oies sauvage, l'implémentation de ces nouvelles réglementations pousse les mineurs à délocaliser leurs activités dans des pays au cadre environnemental moins exigeant (Sanderson, 2022)²⁵. Autrement, une partie de l'industrie poursuit ses activités illégalement.

3.3. Les politiques gouvernementales : dompter une industrie récalcitrante

Alors que le secteur minier croît à un rythme soutenu, les pouvoirs centraux désirent mettre à profit cet avantage sur des dossiers politiques et géopolitiques. Ils font néanmoins face à de nouvelles problématiques. En plus des thématiques environnementales et d'épuisement des ressources, la concentration de la production des métaux non-ferreux a entraîné l'émergence d'une filière illégale et d'une contrebande vers les principaux pays consommateurs dont le Japon, la Corée et les États-Unis. Pour parvenir à ses fins et véritablement contrôler ce secteur stratégique, le régime communiste met en place une série de politiques détaillées ci-après.

3.3.1 Règlements sur la prospection et l'extraction

La prospection chinoise trouve sur son sol 24 métaux dont le manganèse, le chrome, le cuivre, le zinc, la bauxite, le tungstène, le tin, le molybdène, l'antimoine, le nickel, l'or, l'argent, le lithium... La loi sur les ressources minérales de 2009 confère les droits de propriété à l'État au nom du peuple chinois. Celui-ci peut émettre des permis de prospecter

25. Cette dynamique de « sortie vers l'extérieur » (走出去 *zǒu chū qù*) et d'internationalisation du secteur minier chinois est accessible en détails dans la version longue de ce mémoire.

ou extraire des ressources naturelles à des entreprises privées. La prospection est menée par les gouvernements, mais peut aussi être attribuée à travers un droit de prospection valable entre 3 et 5 ans (Hu, Li, & Neal, 2021). Les gouvernements locaux concèdent des droits d'exploitation à travers des appel d'offre sauf si le projet est approuvé par le gouvernement central pour 30 ans extensibles. L'approbation du gouvernement central est nécessaire lorsqu'il s'agit d'un projet relatif à l'exploitation des terres rares ou de métaux radioactifs. Lorsqu'il s'agit de capitaux étrangers, des mesures administratives spéciales protègent le secteur minier. Par exemple, aucun capital étranger ne peut servir à la prospection ou l'extraction de tungstène, terres rares ou des métaux radioactifs (Hu, Li, & Neal, 2021). En 2002, la politique chinoise prend un tournant. Seules les coentreprises sont autorisées dans le secteur minier, aucune entreprise ne peut être pleinement possédée par des capitaux étrangers tout en encourageant ces derniers à investir dans les secteurs en aval de la chaîne de valeur (Shen, Moomy, & Eggert, 2020). Toute entreprise minière doit verser des royalties pour l'exploitation d'une ressource sur le sol chinois. Cette royauté est fixée lors de la signature du contrat. Si ce montant est trop bas, la taxe devient forfaitaire. À cela s'ajoute une taxe sur la valeur ajoutée, sur les revenus des entreprises et enfin, sur les importations (Hu, Li, & Neal, 2021).

3.3.2 *Les quotas en Chine*

Une taxe sur les ressources minières augmente le prix des matières premières. Parallèlement, elle entraîne une augmentation des exploitations illégales ainsi que la compétitivité de ces dernières vis-à-vis des entreprises légales car celles-ci ne respectent pas les taxes (Yi, Dai, Cheng, & Wu, 2020). En Chine, le système actuel confère au gouvernement central le pouvoir d'allocation ou d'exploitation des ressources et de production de métaux aux différents gouvernements provinciaux. Pour ce qui est des quotas à l'export, ceux-ci sont directement fixés par le gouvernement central (Yi, Dai, Cheng, & Wu, 2020). Les quotas à la production apparaissent en 1991. Les objectifs d'alors étaient de réduire la pollution, réduire la consommation d'énergie de la filière mais aussi protéger l'industrie de différentes ressources minières tout en évitant une surexploitation des ressources. Ces quotas ont été progressivement implémentés pour toucher des métaux comme les terres rares, l'antimoine, le tungstène et l'on distingue généralement trois étapes : la première phase débute en 1991 et prend fin en 2001 pour encadrer un écosystème minier chaotique, sous-efficient, tout en surexploitant les ressources du sous-sol chinois. Cette surexploitation peut être responsable d'une perte de compétitivité future, naturellement obtenue grâce à la richesse des sols chinois comme c'est le cas de l'antimoine. Les mesures visaient à la standardisation de la production et le contrôle de la

production, de la fonte et du raffinage des différents minerais. Elle pose les bases des politiques gouvernementales futures. C'est le cas de la note sur la suspension de délivrance de permis miniers pour huit types de métaux dont les terres rares qui restreint l'accès au sous-sol chinois pour des particuliers.

La deuxième phase prend place à la suite de la première et s'étend jusqu'en 2010. Elle confronte ouvertement la surexploitation et la surconsommation et met en place les premiers quotas officiels sur la production tout en contrôlant avec plus de sévérité l'accès aux droits d'exploitation. Cette politique se concrétise en 2002 pour le tungstène. En 2005, les quotas s'étendent à l'étain et l'antimoine avant d'être complétés avec les terres rares en 2006. Ces politiques seront reformulées au sein du Plan National pour les ressources minérales de 2008. Deux types de quotas sont alors alloués par deux ministères différents au sein du gouvernement central : le ministère des terres et des Ressources ainsi que le ministère de l'Industrie et des Technologies de l'Information. Les quotas du ministère des Terres et des Ressources étaient assignés à chaque province, tandis que les quotas du ministère de l'Industrie ciblaient directement les entreprises. Cette confusion perdure jusqu'en 2010 où les quotas fusionnent de même que les entreprises du secteur se regroupent en six entreprises nationales (Shen, Moomy, & Eggert, 2020). Enfin, en 2010, les premiers quotas sont formulés pour l'alumine et la fluorite.

La troisième phase débute en 2011 pour renforcer le contrôle offert durant la seconde phase. L'objectif est de scientificiser et rationaliser les quotas et les différentes régulations afin d'optimiser la production de métaux et leurs allocations. À travers ses mesures provisoires pour la gestion du contrôle des quantités minières produites, le gouvernement central renforce l'emprise des provinces sur les quotas de production. En revanche, la perte de compétitivité des minerais d'antimoine pousse le gouvernement à retirer les contrôles quantitatifs de la production du métal gris. L'objectif est désormais de faire venir en Chine la chaîne de valeur en aval des métaux (Yi, Dai, Cheng, & Wu, 2020).

Dans le domaine des terres rares, le gouvernement chinois tente tout d'abord de subventionner son industrie dans le but de la rendre compétitive. En 1985, sous l'impulsion de Deng Xiaoping, la République populaire adopte le programme 863 consacré au développement de la haute technologie nationale dans laquelle les terres rares ont un rôle important à jouer. Celles-ci deviennent éligibles à un remboursement fiscal de 13 % pour les minerais et 17 % pour le métal raffiné (Park & Jung, 2015). Cette première politique dope la production domestique qui passe de 8500 tonnes à 16 500

tonnes en seulement 5 ans. À la fin 1989, la deuxième partie de la politique voit le jour lorsque l'entreprise française Rhône-Poulenc (plus tard Rhodia puis Solvay) se voit refuser l'extension de sa licence de gestion de déchets polluants sur son site de la Rochelle. L'entreprise décide alors de délocaliser en Chine son activité. Peu après, de nombreux sites de raffinage de terres rares quittent le Japon pour s'installer à leur tour en Chine. À l'époque cependant, le raffinage des métaux prend place dans les pays développés d'Occident et au Japon. C'est pourquoi cette politique de séduction des capitaux étrangers se déplace peu à peu le long de la chaîne de valeur. En effet en 2007, l'obligation de joint-venture pour les investissements étrangers qui ne concerne jusque-là que l'exploration et l'excavation s'étend à la fonte et au raffinage. Or, les joint-ventures sont des modèles d'entreprise qui facilitent grandement les transferts de technologies entre les deux entreprises préexistantes (Shen, Moomy, & Eggert, 2020).

En 2003, l'entreprise espagnole Gamesa obtient le droit de s'implanter en Chine moyennant un transfert de technologies à des entreprises locales. En 2005, alors que l'entreprise détient 35 % des parts du marché chinois, l'État fait passer une loi de protection de son marché éolien imposant que 70 % des pièces utilisées dans des projets éoliens chinois soient fabriquées localement par des industriels chinois. Cette politique met à mal l'entreprise espagnole au profit des entreprises chinoises naissantes qui contrôlent 3 ans plus tard 85 % du marché intérieur avant de dominer le marché mondial en 2010. C'est ici en profitant d'un avantage comparatif sur le prix des métaux que la Chine séduit les capitaux étrangers pour construire un écosystème industriel à haute valeur ajoutée en aval de la chaîne de production, avant de siniser cet écosystème grâce à un transfert de compétences et de technologies des entreprises occidentales. Comme le souligne Ian Lange :

« La Chine n'est pas le principal producteur en raison de la géologie ou quelque chose comme cela, elle est un producteur à bas coût parce qu'elle subventionne, et maintenant elle dispose de plus d'installations de traitement que ce que la demande mondiale requiert, ce qui lui permet de menacer tout autre producteur potentiel en raison de sa taille considérable. »

(Lange, 2023)

La période allant de 1991 à 1998 marque un premier tournant dans la politique commerciale chinoise des métaux non-ferreux. Deng Xiaoping cristallise cette ambition à travers sa célèbre phrase : « Les terres rares sont à la Chine ce que le pétrole est au Moyen-Orient » (Smaïli, 2022). Si la première phase a permis l'ascension d'une industrie naissante, le modèle fait désormais face à une profonde anomie, une corruption et une

illégalité rampantes, ainsi qu'une mauvaise rentabilité du fait des faibles prix. Le secteur des terres rares augmente néanmoins de 22 % pour atteindre 65 000 tonnes, soit 85 % du marché mondial. Pour faire face à ces problèmes endémiques, le gouvernement central met en place les premiers quotas à l'export et ses premières taxes à l'export sur les terres rares en 1999. Ces quotas à l'export ont pour but de limiter les exportations de métaux en amont de la chaîne de valeur. Plus encore, il ambitionne de rapatrier cette chaîne en Chine. Pour cela, le bureau applique des taxes différenciées, fortes pour les produits les moins transformés, nulles pour les biens manufacturés. Cela signifie que les entreprises en aval de la production trouvent soudainement un avantage comparatif à s'installer en Chine plutôt qu'ailleurs, le prix des matières premières y étant moins élevé. C'est aussi l'instauration des premières clauses environnementales. Entre 2005 et 2010, les réductions d'impôts pour les entreprises exportatrices sont progressivement réduites puis retirées. Dès 2008, les premières taxes de 10 % sur les exportations apparaissent sur les minerais bruts avant de monter jusqu'à 25 %. Ces taxes ont pour but d'attirer toujours plus les investissements dans les industries à haute valeur ajoutée, ce qui entraîne une transformation profonde de l'industrie minière chinoise. Ainsi, la Chine profite de la faible criticité de ses métaux non-ferreux pour développer une stratégie industrielle agressive.

Le tonnage des exportations diminue mais la valeur ajoutée des produits exportés augmente à mesure que la chaîne de valeur s'implémente en Chine pour éviter les taxes à l'export. Cela a néanmoins comme conséquence d'augmenter les marges des mines illégales qui vendent à prix de marché sans payer cette taxe (Park & Jung, 2015).

3.3.3 *La mine illégale et les politiques gouvernementales anticorruption*

Véritable angle-mort de l'analyse de la criticité des métaux en Chine, la corruption et la mine illégale sont endémiques des premières décennies de la politique minière chinoise. Nous l'avons vu, elles dégradent l'indice environnemental par des pratiques plus polluantes et troublent les autres indicateurs par l'opacité de leurs pratiques. En effet, l'adoption des techniques d'extraction du chimiste Xu Guangxian dans les années 1980 permet une séparation moins onéreuse des métaux de leur minerai pour les petits producteurs. Ceux-ci peuvent alors répondre avec plus d'agilité aux injonctions du marché, ce qui est l'un des atouts des mines illégales. Celles-ci sont la plupart du temps des mines de petite échelle, dispersées et à ciel ouvert (Park & Jung, 2015). La principale méthode pour excaver les terres rares de sols argileux est dite du lessivage in situ. On creuse des trous de trois mètres de profondeur avant d'injecter directement une solution de lessivage autour du trou. La solution pénètre l'argile et se gorge des métaux présents dans le sol avant de venir remplir le trou. Cette solution préserve au mieux

l'environnement dans lequel elle a lieu mais ses performances économiques sont moins compétitives que d'autres méthodes. La mine de surface est interdite par le gouvernement pour son impact écologique mais demeure la méthode privilégiée des mineurs illégaux.

Esquivant avec efficacité les politiques du gouvernement central, ces mines illégales menacent la rentabilité des entreprises étatiques (Shen, Moomy, & Eggert, 2020). L'ampleur du phénomène des mines illégales fait l'objet de controverses au sein de la littérature sur le sujet. Certains témoignent d'une nette réduction de 30 à 20 % de l'industrie entre 2003 et 2014 (Adamas Intelligence, 2017). D'autres études varient considérablement et estiment que la facette illégale représente jusqu'à 40% de l'industrie (Packey & Kingsnorth, 2016). Ces mines illégales agressent non seulement les marges des entreprises chinoises mais se révèlent avoir un impact écologique plus important que les entreprises contraintes par l'État. Surtout, les mines illégales menacent l'atout stratégique de la Chine car elles maximisent les profits davantage que les réserves et ne se subordonnent pas à la politique de Beijing (Shen, Moomy, & Eggert, 2020).

Selon Kingsnorth, la résilience des mines illégales est liée à leur forte coopération avec les gouvernements locaux qui profitent d'une source d'emplois et de revenus qui n'existeraient pas autrement. C'est donc une opposition entre les intérêts des gouvernements locaux et le gouvernement central qui nourrit le secteur illégal (Packey & Kingsnorth, 2016). D'autres estiment cette explication incomplète. Il s'agit du poids indirect que cela apporte dans le PIB régional car les matières premières produites illégalement intègrent par la suite l'économie légale, stimulant cette-dernière et par-là, les recettes fiscales des gouvernements locaux. Les provinces chinoises ne sont en effet pas habilitées à lever de nouvelles taxes ou changer les niveaux de taxation d'impôts préexistants. De fait, le budget du gouvernement local dépend étroitement du PIB local (Park & Jung, 2015). Il s'agit aussi de faire fonctionner un écosystème de produits intermédiaires en concurrence avec les autres régions. Or, les quotas ne peuvent répondre à la demande d'autant de sites en compétition. Pour éviter que l'industrie d'une province ne dépérisse au profit d'une autre, les gouverneurs locaux alimentent leur étalon par des moyens détournés. Enfin, l'argument de la corruption semble important, que ce soit sous la forme de pots-de-vin ou bien de dividendes dans les mines illégales. Dans le premier cas, le secrétaire du comité du comté d'An 'Yuan a été condamné à 17 ans de prison pour avoir autorisé des mines illégales à des individus apparentés. Il s'ajoute ainsi à la liste des 20 officiels condamnés à An 'Yuan. Le second cas de corruption médiatisé a

lieu dans la province de Mongolie-intérieure où le Vice-président Yiyang Pan est condamné à 20 ans de prison pour avoir accepté des pots-de-vin entre 1999 et 2014 dans le Jiangxi et en Mongolie-intérieure. C'est cette distinction entre les droits d'extraction, de propriété et les dividendes qui entraîne cette opposition entre gouvernements locaux et entreprises d'un côté, et gouvernement central de l'autre (Shen, Moomy, & Eggert, 2020).

L'observation d'une contrebande des terres rares en Chine se renforce à partir des années 2000. On constate en effet une importation de terres rares par des pays consommateurs comme le Japon, l'Europe ou les États-Unis plus importante que les quotas à l'exportation fixés par la Chine. La contrebande réagit fortement au prix et se renforce lorsque les prix grimpent. Une réduction des quotas a donc pour conséquence une inflation nette. En 2010, la Chine produit 97 % des terres rares. À la suite du litige territorial sino-japonais, la Chine décide alors de couper les quotas à l'exportation de terres rares pour le Japon en parallèle d'une réduction des quotas du ministère de l'industrie. L'inélasticité de la demande internationale à court-terme et une légère panique des marchés financiers déclenche une hausse des prix (+1000 %). Pour autant, la pénurie ne frappe pas Tokyo qui importe essentiellement de la contrebande alors en pleine expansion (Shen, Moomy, & Eggert, 2020). La contrebande vers les marchés internationaux représente 30 à 40 % de la contrebande, principalement à destination du Japon et de la Corée du Sud. Pour y faire face, l'État met en place une politique de stockage. En 2014, le gouvernement achète 10 000 tonnes de terres rares aux 6 plus grosses entreprises du secteur et exige des entreprises qu'elles stockent 30 % des quantités achetées par le gouvernement (Shen, Moomy, & Eggert, 2020). Autrement, de vastes campagnes d'investigation et de répression des mines illégales voient le jour chaque année pour endiguer cette menace.

3.4. Les métaux stratégiques comme armes géopolitiques

L'importance des métaux non-ferreux n'est assurément pas leur valeur économique intrinsèque. La valeur marchande du marché des métaux représente une extrême minorité de l'économie mondiale. C'est davantage le rôle stratégique que ces métaux jouent dans certains secteurs clés et l'optimisation des performances qu'ils apportent à certaines technologies qui fait leur force. Comme le rappelle Ian Lange :

« Certes, ils (la Chine) les (terres rares) utilisent dans de nombreux matériaux et produits, mais le marché du pétrole et du gaz représente environ cinq à huit billions (mille milliards) de dollars, tandis que le marché des terres rares est d'environ un milliard de dollars. C'est une limite bien plus petite. Il est peu

probable qu'il n'atteigne jamais une échelle aussi importante que le marché mondial du pétrole et du gaz. »

(Lange, 2023)

Les années de 2010 à 2015 marquent un tournant majeur de la politique minière commerciale de la Chine. Jusqu'ici, l'attention de la scène internationale ne s'était jamais réellement portée sur la concentration de terres rares en Chine, alors même que cette dernière excave 70 % des terres rares mondiales et en raffine 97 %. En septembre 2010, une tension diplomatique survient entre Beijing et Tokyo sur une question de souveraineté en mer de Chine orientale (Seaman, 2019). Alors qu'un chalutier chinois pénètre dans les eaux des îles Senkaku, il est arraisonné par les garde-côtes nippons. L'équipage est momentanément arrêté avant d'être libéré, mais son capitaine est emprisonné. En représailles, la Chine suspend alors ses exportations de terres rares en direction de son voisin, utilisant ainsi son avantage dans ce qui s'apparente à un bras de fer politico-économique (Niquet, 2011). Le Premier ministre chinois menace de « nouvelles mesures » si le capitaine n'est pas immédiatement libéré. En réalité, l'affaire n'est pas la volonté des nationaux chinois mais davantage du personnel militaire et des officiels locaux des ports de la côte qui désirent donner « une bonne leçon ». Le gouvernement central découvre le de facto embargo par le ministre du Commerce japonais. Il désavoue alors l'initiative locale et démet de leurs fonctions les responsables portuaires (Klinger, 2017). Le bilan du litige se résume à une réduction des importations japonaises de 20 000 tonnes de terres rares (Pitron, 2021)

À la suite de ce bras de fer géoéconomique, les pays occidentaux attaquent la Chine devant l'Organe de règlement des différends de l'Organisation mondiale du commerce. La Chine y est accusée d'avoir imposé des restrictions à l'export sur des terres qui n'étaient pas dans la liste publiée par le gouvernement de Beijing. De plus, imposer de telles restrictions va à l'encontre du protocole de l'OMC. La Chine est condamnée et priée de bien vouloir retirer ses restrictions. Cette défaite commerciale dans le secteur des terres rares s'ajoute à celle du tungstène, du molybdène des mêmes années mais aussi du coke de charbon en 2004 et sur neuf autres minéraux en 2012. Si elle regrette officiellement la décision de l'OMC, la Chine aurait alors pu refuser et partir dans un bras de fer économique, politique et commercial avec l'Occident mais préfère poursuivre sa stratégie d'attraction de capitaux étrangers dans des domaines à haute valeur ajoutée (Sanderson, 2022).

Une dernière passe d'armes prend place aux premiers jours de juillet 2023 alors qu'une guerre économique oppose les États-Unis à la RPC. En effet, Washington aspire à isoler sa rivale Beijing de la chaîne d'approvisionnement en semi-conducteurs. La semaine

précédente, les Pays-Bas annonçaient leur propre restriction des exportations de machines de semiconducteurs ASML. Plus tôt dans le mois, C'est Tokyo qui lançait sa propre législation à l'encontre de l'industrie chinoise. (Zhou, 2023). En représailles autant que pour limiter l'épuisement de ses propres ressources, le gouvernement central annonce une nouvelle série de restrictions. Alors productrice de près de 95% du gallium et 65 % du germanium, le conseil d'État chinois est chargé de surveiller les exportations des minerais riches en ces deux métaux. Ces-derniers étant particulièrement prisés par le secteur des semi-conducteurs, la Chine espère compliquer le rapatriement de la chaîne de valeur du pays. Le contrôle de ces exportations débute le premier aout 2023, affecte de nombreux pays mais la première cible sont les États-Unis (Razdan, 2023).

Conclusion

Le secteur minier chinois a été traversé par une puissante dynamique depuis les politiques économiques de Deng Xiaoping. Tout d'abord, la quête de croissance et la construction de la filière ont séduit les capitaux étrangers pour développer les mines chinoises tout en acquérant les technologies les plus modernes. Cette stratégie d'attraction des capitaux s'est traduite par la multiplication des acteurs et une surcapacité de production chronique à l'échelle du pays. La forte concurrence entre les entreprises minières a poussé les prix à la baisse et ce, au détriment de la préservation de l'environnement sur le sol chinois. Une fois le secteur minier confortablement implanté, le gouvernement a alors réorienté sa stratégie pour désormais développer les filières en aval de la chaîne de valeur, particulièrement les produits semi-finis et les produits manufacturés. Il tire parti de son avantage pour favoriser les entreprises implantées en Chine face à leurs concurrentes à l'étranger. D'un pays exportateur net de matières premières, cette croissance de l'industrie chinoise nourrit peu à peu sa consommation domestique de métaux jusqu'à ce que sa propre production ne suffise plus.

En parallèle de cette première dynamique des investissements prend place une seconde force motrice du secteur minier. À mesure que la puissance minière chinoise se confirme, la volonté du pouvoir central d'en faire un instrument d'influence et de contrainte s'intensifie. Le début du XXI^e siècle témoigne des tentatives croissantes du régime pour contrôler ce secteur stratégique. Par des quotas, des normes ou des fusions d'entreprises, le gouvernement renforce toujours plus le marché des métaux non-ferreux entre les mains d'une poignée d'entreprises à ses ordres. Pourtant, cette

stratégie se solde dans un premier temps par l'émergence d'entreprises minières illégales sur son sol. Celles-ci, tolérées voire encouragées par les gouvernements locaux, font la richesse de quelques-uns au détriment de l'environnement et des intérêts de Beijing. Particulièrement, les mines illégales et la contrebande se révèlent être un fâcheux obstacle aux vellétés politiques du régime communiste lorsqu'en 2010, elles alimentent les pays affectés par un embargo *de facto* sur les terres rares.

Entre pénurie de matières premières, mondialisation, lutte contre l'illégalité, instrumentalisation économique ou politique et face aux enjeux du réchauffement climatique le secteur minier est mondialement acclamé autant qu'il est pointé du doigt. La Chine ne déroge pas à la règle et encadre toujours plus le secteur pour ses déboires environnementaux qu'elle ne l'utilise pour ses intérêts économiques et politiques. Ce travail contribue à affiner la compréhension des enjeux miniers en Chine et interroge la notion de criticité. Ce terme rejeté par les académiciens chinois pêche par son manque de considérations environnementales et l'emphase qu'il place sur la vulnérabilité et au détriment des opportunités de la filière. Les positions dominantes de la Chine sur la question et sa volonté d'en faire une arme géoéconomique font de la criticité un élément pour saisir la stratégie et les enjeux du pays-continent. L'aspect écologique du secteur minier est abordé au travers de la nouvelle méthode de calcul proposée. En créant une troisième dimension à la criticité et en considérant les émissions de gaz à effet de serre, l'ambition de ce mémoire est de considérer un peu mieux l'impact environnemental de métaux jusque-là sous-estimé voire ignoré. Dans un second temps, la notion de « métaux stratégiques » complémente celle de « métaux critiques » et offre un cadre d'analyse plus dynamique et plus coercitif que le second. Les métaux non-ferreux sont une composante importante dans les solutions au réchauffement climatique et leur contrôle engendre des tensions et des conflits internationaux. Ces approches montrent aussi comment cette filière fait l'objet d'un conflit entre les grandes puissances mondiales, non seulement pour des questions d'accès aux ressources mais aussi comme instrument d'une opposition plus politique.

Références

Adamas Intelligence (2016). *Chinese NdPr oxide price up 50% YTD – Panic or Party?*. Adamas Intelligence. https://www.adamasintel.com/wp-content/uploads/2018/02/Adamas_Intelligence-Panic_or_Party_Briefing-August_10_2017.pdf.

Andersson, P. (2020). « Chinese assessments of “critical” and “strategic” raw materials: Concepts, T categories, policies, and implications » *The Extractive Industries and Society* 7(1), 127-137. doi: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.01.008>

Andersson, P. (2021). « The Arctic as a “Strategic” and “Important” Chinese Foreign Policy Interest: Exploring the Role of Labels and Hierarchies in China’s Arctic Discourses » *Journal of Current Chinese Affairs* 0(0) 1-27, 10.1177/18681026211018699.

Andersson, P., J. W. Zeuthen, et P. Kalvig (2018). Chinese Mining in Greenland Arctic Access or Access to Minerals? In *Arctic Yearbook* 1-15. https://vbn.aau.dk/ws/files/295149219/7_AY2018_Andersson.pdf.

Banque mondiale (2017). *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future*. (Washington) Banque mondiale. <http://documents1.worldbank.org/curated/en/207371500386458722/pdf/117581-WP-P159838-PUBLIC-ClimateSmartMiningJuly.pdf>

Bénichi, R. (2010). *La Mondialisation*. (Paris) Nathan.

Bihouix, Philippe, interviewé par Sky. (2018). *Le mensonge de la croissance verte ?* (11 janvier). <https://www.youtube.com/watch?v=Bx9S8gvNKkA>.

Boisseuil, D., C. Rico, et S. Gelichi. (2021). *Le marché des matières premières dans l’Antiquité et au Moyen Âge*. Publications de l’Ecole française de Rome.

Bonelli, A. (2021). *China’s Rare-Earth Dominance Is a Security Risk for NATO and Western Supply-Chain Resilience*. International Center for Defence and Security. <https://icds.ee/en/chinas-rare-earth-dominance-is-a-security-risk-for-nato-and-western-supply-chain-resilience/>.

BP (2022). *BP Statistical Review of World Energy*. BP Statistical Review. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>.

BRGM (2020). *Criticality assessment – Silicon metal*. Mineralinfo, <https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2020-12/materialcriticalitysiliconmetal-public20191030.pdf>.

Bueb, J., et É. To (2020). *Note d’analyse : Comment évaluer l’externalité carbone des métaux 2020*. France Stratégie, <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2020-na96-externalite-carbone-metiaux-octobre.pdf>.

Cai, Meifeng, Peng Li, Wenhui Tan, et Fenhua Ren. (2021). « Key Engineering Technologies to Achieve Green, Intelligent, and Sustainable Development of Deep Metal Mines in China » *Engineering* 7(11). 1513-1517.

Chen Stephen. (2023). « Chinese scientists turn to artificial intelligence as potential 1,000km seam of rare metal minerals found in Himalayas », *South China Morning Post*, 21 juin, <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3224830/chinese-scientists-turn-artificial-intelligence-after-1000km-seam-rare-earth-minerals-discovered>.

Clément, A. (2021). « L’écologie politique aux caractéristiques chinoises » *Green* 1, 121-127. <https://www.cairn.info/revue-green-2021-1-page-121.htm>.

European Commission (2023) Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Grohol, M., Veeh, C. *Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 Final Report*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585>

Connaissance des Énergies (2020). *Erreur fréquente : « On consomme des kW »*. Connaissance Des Énergies. Consulté le 13 mars 223 sur <https://www.connaissancesenergies.org/idees-recues-energies/erreur-frequence-consomme-des-kw>.

Eggert, R., interviewer par Archibald André. (2023). *Illegal mining in China and eco-social goals in the mining industry* (10 février).

Elshkaki, A., et T.E. Graedel (2015). « Solar cell metals and their hosts: A tale of oversupply and undersupply » *Applied Energy* 158. 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.066>.

Encyclopaedia Britannica (2003). *Rhône-Poulenc SA*. Encyclopaedia Britannica. Consulté le 15 mars 2023 sur <https://www.britannica.com/topic/Rhone-Poulenc-SA>.

Ernest P. Young & al. (2023). *China*. Britannica. C. le 8 février 2023 sur <https://www.britannica.com/place/China/Minerals>.

Foucaud, Y., interviewé par Archibald André (2023). *Enjeux énergétiques et histoire des matières premières* (30 janvier). <https://www.youtube.com/watch?v=VqlSJhevvbA>.

Frankopan, P. (2017). *Les routes de la Soie, L'histoire du cœur du monde*. Nevicata.

Gao, Tian-ming, Na Fan, Wu Chen, et Tao Dai. 2023. « Lithium extraction from hard rock lithium ores (spodumene, lepidolite, zinnwaldite, petalite): Technology, resources, environment and cost », *China Geology* 6(1), 137-153.

GIEC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (Cambridge) Cambridge University Press.

GIEC (2014). *Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. (Genève). GIEC, 161. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf

GIEC (2023). Summary for Policymakers. Dans: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (Genève) GIEC, https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf

Gloser, S., L. Tercero Espinoza, C. Gandenberger, et M. Faulstich (2015). « Raw Material Criticality in the Context of Classical Risk Assessment », *Resources Policy* 44, 35-46.

Görner Stepha, Kudar Gregory, Mori Lapo, Reiter Sebastian, and Samek Robert (2020). *The mine-to-market value chain: A hidden gem*. McKinsey. Consulté le 13 février sur <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-mine-to-market-value-chain-a-hidden-gem>.

Guo, Jiaxin, Zhenqi Hu, et Yusheng Liang. (2022). « Causes and Countermeasures for the Failure of Mining Land Use Policy Reform: Practice Analysis from China » *Land* 11(9). <https://doi.org/10.3390/land11091391>.

Henckens, Theo (2021). « Scarce mineral resources: Extraction, consumption and limits of sustainability » *Resources, Conservation and Recycling* 169, 105511.

Hobbes, Thomas (1889). *Behemoth or the Long Parliament*. (Londres) Cornell University Library.

Hobbes, Thomas (1651, 2000). *Léviathan*. (Paris) Folio.

Hu, Guohua, Yingnan Li, et Jincheng Tongda & Neal (2021). *Mining in China: overview*. Thomson Reuters Practical Law. Consulté le 8 février 2023 sur [https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com/w-011-1348?contextData=\(sc.Default\)&transitionType=Default&firstPage=true](https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com/w-011-1348?contextData=(sc.Default)&transitionType=Default&firstPage=true).

Hu, Yuan, et Mark Poustie (2018). « Urban mining demonstration bases in China: A new approach to the reclamation of resources » *Waste Management* 79, 689-699.

Hubbert, M. K. (1956). « Nuclear Energy and Fossil Fuels » *Drilling and production practice*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:127059058>

IEA (2021). *Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer*. International Energy Agency. Consulté le 17 février sur <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>.

IEA (2023). *Implementing Clean Energy Transitions*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/implementing-clean-energy-transitions>.

IEA (2022). *The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions*. IEA. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>.

Institute for European Studies (2021). *Metals for a Climate Neutral Europe A 2050 Blueprint*. Eurometaux, <https://www.eurometaux.eu/media/1997/exec-summary-metals-2050.pdf>.

Institute for European Studies (2019). *Metals for a Climate Neutral Europe A 2050 Blueprint*. Eurometaux, <https://eurometaux.eu/media/1997/exec-summary-metals-2050.pdf>.

International Resource Panel (2020). *Mineral Resource Governance in the 21st Century Gearing Extractive Industries Towards Sustainable Development*. (Nairobi) United Nations Environment Programme, <https://www.resourcepanel.org/reports/mineral-resource-governance-21st-century>

Jancovici, Jean-Marc. s.d. « Jean-Marc Jancovici » *YouTube*. Accès le 20 février 2022. <https://www.youtube.com/@jean-marcjancovici2537>.

Johnson, Keith, et Elias Groll (2019). « China Raises Threat of Rare-Earths Cutoff to U.S » *Foreign Policy*. <https://foreignpolicy.com/2019/05/21/china-raises-threat-of-rare-earth-mineral-cutoff-to-us/>.

Kawajiri, K., Kiyotaka T., et Shigeyuki U. (2022). « Lifecycle assessment of critical material substitution: Indium tin oxide and aluminum zinc oxide in transparent electrodes. » *Resources, Environment and Sustainability* 7. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2022.100047>.

Kim, Byung-Kook, et Ezra Vogel (2011). *The Park Chung Hee Era: The Transformation of South Korea*. (Cambridge) Harvard University Press.

Klinger, J. M. (2017). *Rare Earth Frontier*. (London) Cornell University Press.

Lange, Ian, interviewé par Archibald André. 2023. *Geopolitics of mineral mining* (9 février).

Laïdi, Ali. (2016). *Histoire mondiale de la guerre économique*. Paris, Perrin.

Lee, J., M. Bazilian, B. Sovacool, K. Hund, S.M. Jowitt, T.P. Nguyen, A. Månberger, *et al.* (2020). « Reviewing the material and metal security of low-carbon energy transitions » *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 124. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109789>.

Lee, Jordy, Morgan Bazilian, B Sovacool, et S. Greene (2020). « Responsible or reckless? A critical review of the environmental and climate assessments of mineral supply chains » *Environmental Research Letters* 15(10), 103009.

Li, Mojie, Zhifu Mi, D'Maris Coffman, et Yi-Ming Wei (2018). « Assessing the policy impacts on non-ferrous metals industry's CO2 reduction: Evidence from China » *Journal of Cleaner Production* 192, 258-261.

Li, Tiankui, Yi Liu, Sijie Lin, Yangze Liu, et Yunfeng Xie (2019). « Soil Pollution Management in China: A Brief Introduction » *Sustainability* 11(3), 556.

Mancheri, Nabeel A., Benjamin Sprecher, Gwendolyn Bailey, Jianping Ge, et Arnold Tukker (2019). « Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience », *Resources, Conservation and Recycling* 142, 101-112.

Mann, Michael E. (2022). « Greenhouse gas ». *Britannica*. Consulté le 20 février 2023 sur <https://www.britannica.com/science/greenhouse-gas>.

Ministry of Natural Resources (2016). *全国矿产资源规划: [Planification nationale des ressources minérales]*. (Beijing) Ministry of Natural Resources. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/chn189649.pdf>.

Ministry of Natural Resources (2020). *China Mineral Resources*. Ministry of Natural Resources. <http://news.chinatangsten.com/pdf/China-Mineral-Resources-2020-en.pdf>.

Nakano, J. (2022). « *The Geopolitics of Critical Minerals Supply Chains* », Center for Strategic and International Studies. https://csis-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/publication/210311_Nakano_Critical_Minerals.pdf?VersionId=DR03x5jlrwLnNmPDD3SZjEkGEZFEcqt.

Nassar, N. T., T. E. Graedel, et E. M. Harper (2015). « By-product metals are technologically essential but have problematic supply » *Science Advances* 1(3), doi: 10.1126/sciadv.1400180.

National Bureau of Statistics of China (2021). *China Statistical Yearbook*. (Beijing) China Statistics Press. Consulté sur <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2021/indexeh.htm>.

Navarro, J., et Fu Z. (2014). « Life-cycle assesment of the production of rare-earth elements for energy applications: a review » *Frontiers in Energy Research* 2. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2014.00045>.

Niquet, V. (2011). « La Chine et l'arme des terres rares » *Revue internationale et stratégique* 84, 105-113.

Otto, J. (2005). « The competitive position of countries seeking exploration and development investment » Dans Michael D. Doggett et John R. Parry, *Wealth Creation in the Minerals Industry: Integrating Science, Business, and Education* (109-125). <https://doi.org/10.5382/SP.12.06>

Owen, J., et D. Kemp. (2013). « Social licence and mining: a critical perspective » *Resources Policy* 38(1) 29-35.

Packey, D. J., et D. Kingsnorth. (2016). « The impact of unregulated ionic clay rare earth mining in China » *Resources Policy* 48, 112-116.

Park, Sun Ryung, et Joo-Youn Jung. (2015). « Between the Local Governments and Producers: Why Rare Earth Smuggling Persists in China » *Journal of International Politics* 20(2), 101-132.

People's Bank of China. (2021). 人民银行有关负责人就《关于进一步防范和处置虚拟货币交易炒作风险的通知》答记者问. People's Bank of China. Consulté le 24 septembre 2023 sur <http://www.pbc.gov.cn/goutongjiaoliu/113456/113469/4348556/index.ht>.

Pitron, G. (2021). *La guerre des métaux rares: La face cachée de la transition énergétique et numérique*. Paris, Les Liens Qui Libèrent.

Qi, anyu, Xiaolei Li, Yuntao Shang, Jie Meng, Xuezheng Gao, Zhaoyu Kong, Haixin Li, et Haifei Yan. (2020). *Atlas of Mineral Deposits Distribution*. Beijing: The China Geological Survey Series. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-0972-5>.

René, É. (2019). « La « civilisation écologique » contrôlée par le numérique en Chine » *Multitudes* 76, 86-93.

Ritchie, H., M. Roser, et P. Rosado (2022). *China: Energy Country Profile*. Our World in Data. Consulté le 6 février 2023 sur <https://ourworldindata.org/energy/country/china>.

Ruet, J. (2016). « Un facteur déterminant de la géopolitique des matières premières : la stratégie industrielle de la Chine » *Annales des Mines - Responsabilité et environnement* 82, 16-23.

Sandalow, D., M. Meidan, P. Andrew-Speed, A. Hove, S. Yue Qiu, et E. Downie. (2022). *Guide to chinese climate policy 2022*. The Oxford Institute for Energy Studies.

Sanderson, H. (2022). *Volt Rush: The Winners and Losers in the Race to Go Green*. Oneworld Publications.

Seaman, J. (2019). La Chine et les terres rares: Son rôle critique dans la nouvelle économie. *Notes de l'Ifri*. <https://www.ifri.org/fr/publications/notes-de-lifri/chine-terres-rares-role-critique-nouvelle-economie>.

Seaman, J. (2015). *L'approvisionnement de la Chine en ressources énergétiques et minérales : quel rôle pour les marchés ?* Notes de l'Ifri. https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/note_seaman_ocppc-ifri_fr.pdf.

Shao, Chaofeng, Yang Guan, Zheng Wan, Chunli Chu, et Meiting Ju (2014). « Performance analysis of CO₂ emissions and energy efficiency of metal industries in China Author links open overlay panel » *Journal of Environmental Management* 134, 30-38.

Shen, Y., R. Moomy, et R. G. Eggert. (2020). « China's public policies toward rare earths, 1975-2018 » *Mineral Economics* 33, 127-151.

Smaïli, M. (2022). « Terres rares et métaux critiques, des enjeux de souveraineté sur fond de guerre économique » *Revue Défense Nationale* 855, 67-73.

Sonter, L. J., M. C. Dade, J. E. Watson, et R. K. Valenta. (2020). « Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity » *Nature Communications* 11, 4174.

Speirs, J., Houri, Y., Gross, R. (2013). *Materials Availability: Comparison of material criticality studies: methodologies and results. Working Paper III*. UK Energy Research Centre, <https://d2e1qxpsswcpqz.cloudfront.net/uploads/2020/03/materials-availability-working-paper-iii.pdf>

State Council (2016b). 十三五"国家战略性新兴产业发展规划; National Strategic Emerging Industry Development Plan for the 13th Five-Year Plan. *地质学报; Acta Geologica Sinica* 1189-1209.

State Council (2016a). 全国矿产资源规划 (2016-2020 年); National Mineral Resources Plan (2016-2020). *China Geological Survey*, <http://www.cgs.gov.cn/tzgg/tzgg/201612/W020161206616104236819.doc>.

Stéphane, A., interviewer par Sky. (2023). *Effondrement : notre civilisation au bord du gouffre?* (26 février). https://www.youtube.com/watch?v=FkiMqLD3_YQ&t=1382s

Tagotra, N. (2022). « *The Geopolitics of Renewable Energy* ». The National Bureau of Asian Research. https://www.nbr.org/wp-content/uploads/pdfs/publications/tagotra_jun22.pdf.

Tole, L, et G. Koop (2011). « Do environmental regulations affect the location decisions of multinational gold mining firms? » *Journal of Economic Geography* 11(1), 151-177.

U.S. Geological Survey (2015). *2015, Mineral commodity summaries*. (Reston) U.S. Geological Survey. <http://dx.doi.org/10.3133/70140094.10.3133/70140094>

- U.S. Geological Survey (2023). *Mineral Commodity Summaries 2023*. (Reston) U.S. Geological Survey, <https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2023>
- Unruh, Gregory C. (2000). « Understanding carbon lock-in » *Energy Policy* 28(12), 817-830.
- Valero, A., A. Valero, G. Calvo, et A. Ortego (2018). « Material bottlenecks in the future development of green technologies » *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93, 178-200.
- Vendryes, T. (2012). « La « sortie » des firmes chinoises : une dynamique économique à la signification politique » *Perspectives chinoises* 1, 68-70.
- Vidal, O. (2020). « Impact de différents scénarios énergétiques sur les matières premières et leur disponibilité future » *Annales des Mines - Responsabilité et environnement* 99, 19-23.
- Vidal, O. (2019). « Modélisation de l'évolution long-terme de l'énergie de production primaire et du prix des métaux » *Economie des ressources*, <https://hal.science/hal-02396615/document>.
- Vidal, O. (2018). « Ressources minérales, progrès technologique et croissance » *Temporalités* 28. <https://journals.openedition.org/temporalites/5677>.
- Vogel, F. (2013). *Deng Xiaoping and the Transformation of China*. (Cambridge) Harvard University Press.
- Westfall, L. A., J. Davourie, M. Ali, et D. McGough (2016). « Cradle-to-gate life cycle assessment of global manganese alloy production » *Int J Life Cycle Assess* 21, 1573-1579.
- Yishuang Liu. (2020). Citations de Xi Jinping sur la protection écologique. *French People Daily*, Consulté le 30 avril 2023 sur <http://french.peopledaily.com.cn/Chine/n3/2020/0514/c31354-9690020.html>.
- Yale University (2023). *Environmental Performance Index*. Environmental Performance Index. Consulté le 15 février 2023 sur <https://epi.yale.edu/epi-results/2022/country/chn>.
- Yan, Wenyi, Zhaolong Wang, Hongbin Cao, Yi Zhang, et Zhi Sun (2021). « Criticality assessment of metal resources in China » *iScience* 24. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102524>.
- Yi, Jiahui, Sheng Dai, Jinhua Cheng, et Qiaosheng Wu. (2020). « Production quota policy in China: Implications for sustainable supply capacity of critical minerals » *Resources Policy* 72, 102046.
- Zhao, Guimei, Yong Geng, Wendong Wei, Raimund Bleischwitz, et Zewen Ge. (2023). « Assessing gadolinium resource efficiency and criticality in China » *Resources Policy* 80. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103137>.

