Ressources minérales, stratégiques en Europe

État des lieux

par **ALAIN PRÉAT**

Bien que présentées comme durables, les filières vertes et numériques reposent sur une exploitation intensive des ressources minérales, dont les effets environnementaux, sanitaires et géopolitiques appellent à une analyse critique de la transition énergétique contemporaine. Explications.

Avant-propos : ce texte fait suite à une conférence donnée dans le cadre du CEPULB le 16 décembre 2024 à l'ULB. Un court texte intitulé « Le pacte vert à la lumière de la géologie » a ensuite été publié le 31 janvier 2025 : https://www.science-climat-energie.be/2025/01/31/le-pacte-vert-a-la-lumiere-de-la-geologie/

Photo : Matthew de Livera/Unsplash

Une nouvelle ère énergétique et environnementale ?

Trois révolutions énergétiques depuis à peine plus d'un siècle … ! Nous sommes aujourd'hui entrés dans la troisième révolution. La première vit le jour avec la machine à vapeur et participa à l'essor du charbon, avec la seconde le moteur thermique détrôna le charbon au profit des hydrocarbures, et la troisième révolution (en cours) est technologique et basée sur les énergies « vertes » ou intermittentes promues par le pacte vert européen. Peut-on dire que cette progression récente suivant ces trois phases majeures de la technologie s'est effectuée dans le sens d'un meilleur respect de l'état de la Planète ? Bien que cela soit le discours officiel, rien n'en est moins sûr. Pourquoi ? Tout simplement par la méconnaissance de tout un chacun à comprendre ce qui est réellement utilisé dans les énergies vertes et numériques.

L'actuelle « transition énergétique » a bon dos, elle a toutes les vertus et est ou serait propre. Quant aux hydrocarbures, au charbon, à l'uranium, ils sont accusés de tous les maux, et considérés comme « sales ».

Il n'est pas un jour où cette opposition nous est rappelée… Il n'est pas question dans cet article d'éluder les problèmes de dégradations environnementales liées aux énergies de la seconde révolution industrielle (hydrocarbures conventionnels et non conventionnels, et charbon), qui rappelons-le constituent encore plus de 80% de l'énergie primaire consommée aujourd'hui dans le monde, avec près de 36 % pour la production d'électricité à partir du charbon. Citons par exemple le rejet de quantités de mercure par les centrales au charbon de premières générations. Ici aussi la liste des dégradations environnementales est longue même si de plus en plus de raffineries (pétrole) ou de centrales au charbon sont de mieux en mieux équipées pour éviter les rejets et pollutions diverses.

Pourtant les énergies vertes et le numérique sont bien loin d'être « propres » comme on ne cesse de nous le répéter. C'en est même devenu un argument médiatique majeur, également une obsession des pouvoirs politiques, à la recherche de voix … ?, bref c'est l'étendard duquel on ne peut se dédouaner … à moins de réfléchir sérieusement. Il faut par exemple savoir que la fabrication des ordinateurs et des smartphones utilise 19% de la production globale de métaux rares tels que le palladium et 23% du cobalt. La seule fabrication d'une puce de deux grammes implique le rejet d'environ deux kilogrammes de matériaux. Le produit final ne représente que 2% de la masse totale des déchets générés tout au long du cycle de vie. L'économie numérique consomme déjà 10% de l'électricité dans le monde. Un américain dispose en moyenne de 13 équipements numériques chez lui qu'il change tous les deux ans. Ce chiffre sera multiplié par deux ou trois d'ici 10 ans [1]. D'après Roman Lauren, 80% des déchets électroniques produits aux États-Unis et au Japon sont expédiés, malgré la Convention de Bâle [2], en Asie [3]. Les déchets non économiquement rentables sont conservés comme futurs « minerais » ou réserves stratégiques, particulièrement en Chine, ce qui ne peut que renforcer la position actuelle de ce pays comme leader du marché des terres rares (= REE pour *Rare Earth Elements*) et des métaux rares. Tout cela a bien sûr un coût environnemental et de santé publique. À Baotou, capitale mondiale des terres rares située en Mongolie intérieure, au nord-ouest de Pékin, on ne compte plus le nombre de cancers et autres maladies liés aux rejets toxiques dans les lacs [4, 5]. Tout le monde est au courant mais ferme les yeux, d'autant plus facilement que la charge de la preuve est quasi un combat qui aboutit rarement …

Alors tentons d'établir la réalité portée par le pacte vert…

Le pacte vert dans l'urgence climatique ?

Le pacte vert [6] prolongeant les Accords de Paris (COP21, 2015) [7] concerne trois transitions simultanées : écologique, énergétique et numérique. Sa finalité est de développer pour 2050 une économie totalement décarbonée en Europe, c'est-à-dire atteindre l'objectif « zéro émission nette » [8] programmé par la Commission européenne. Comment ? En développant un réseau électrique, un parc automobile constitué à 100% de véhicules électriques équipés de batteries (NMC) et un mix énergique fourni à plus de 80% (dès 2030) à partir d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques. Les énergies renouvelables intermittentes sont majoritairement sollicitées.

Les minéraux critiques, qui sont essentiels pour toute une série de technologies énergétiques propres, sont devenus une priorité politique ces dernières années en raison de l'augmentation de la demande, de la volatilité des prix, des goulets d'étranglement dans la chaîne d'approvisionnement et des préoccupations géopolitiques. La nature dynamique du marché nécessite une plus grande transparence et des informations fiables pour faciliter une prise de décision éclairée, comme le soulignent les ministres du Groupe des Sept (G7) qui ont récemment demandé à l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) d'établir des perspectives à moyen et long terme pour les minéraux critiques.

Les minéraux critiques sont considérés tels quels sur base de la tension entre l'offre et la demande qu'ils exercent sur le marché. La criticité revêt une importance capitale dans cette thématique, les métaux critiques étant à l'origine d'une concurrence sans limite pour leur obtention. L'Union européenne a pour sa part établi en 2001 une première liste de 14 matériaux critiques essentiels à sa sécurité. Cette liste est amendée tous les trois ans et renferme 34 matériaux critiques en 2023. Les autres ensembles (USA, Chine, Japon …) font de même pour la même raison, et chacun a sa propre liste (Figure 1).

Il s'agit de listes évolutives, liées au statut de chaque métal, pour chaque ensemble de pays. Pour établir sa liste, la Commission européenne se base sur deux paramètres, à savoir l'importance économique et la pénurie d'approvisionnement.

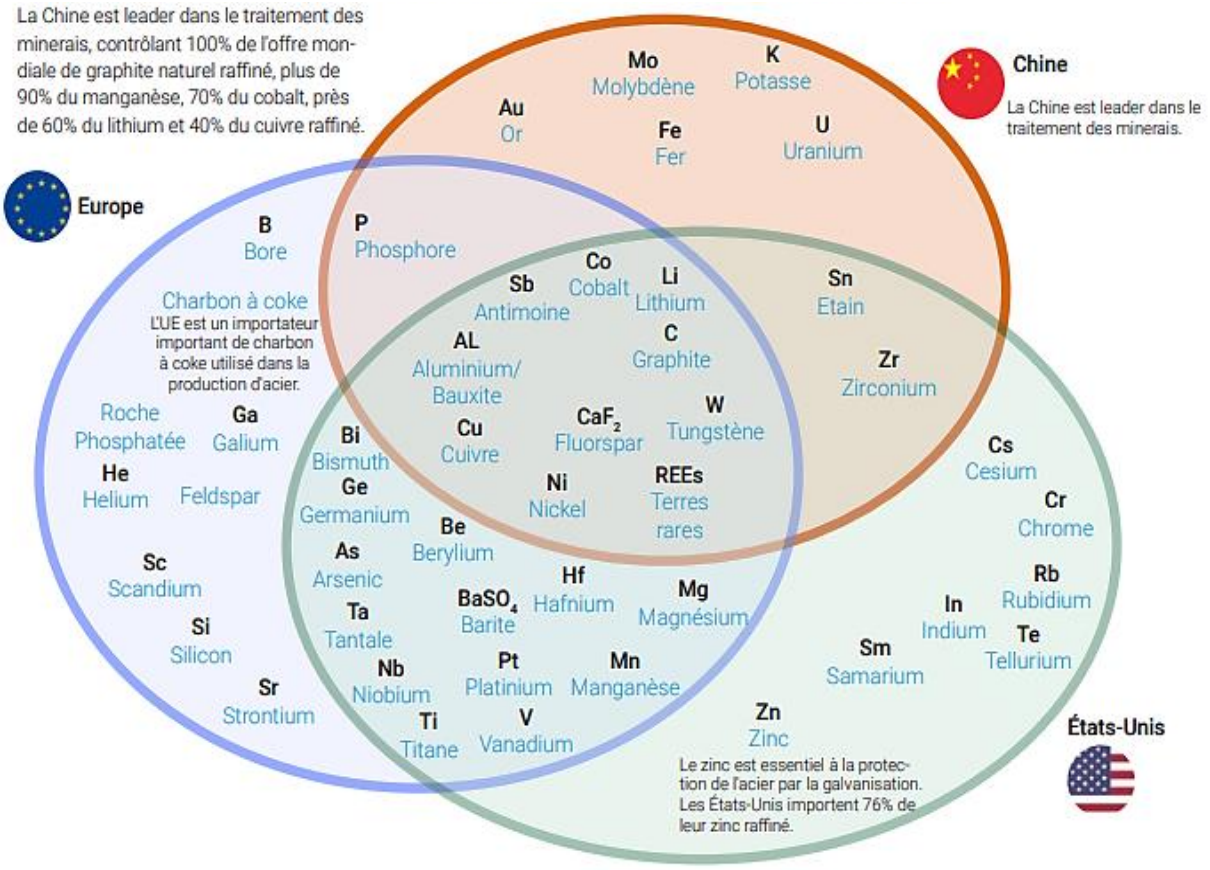


Figure 1 : Les minéraux critiques essentiels à la sécurité de la Chine, de l'Union européenne et des États-Unis. In Gresea, juin 2024.

Un métal peut devenir critique pour de nombreuses raisons :

- ses réserves sont insuffisantes,
- hausse de son utilisation (applications industrielles),
- prix élevé et en augmentation,
- absence de substituts identifiés,
- production dans des pays politiquement instables,
- impacts environnementaux négatifs.

Comme on le voit la notion de criticité n'est pas statique puisqu'elle dépend d'un mélange de considérations économiques, technologiques, environnementales et géopolitiques. Alors, est-il possible de « sortir » de la criticité pour chaque métal ? Oui, par ces trois voies :

- ouverture de nouveaux gisements. Hélas cela prend du temps, il faut en moyenne 17 ans pour ouvrir une mine (voir ci-dessous),
- innovation technologique mais elle est peu prévisible,
- recyclage des métaux : très insuffisant aujourd'hui (voir ci-dessous).

À côté des matériaux ou métaux critiques, existent les « métaux stratégiques », moins bien définis mais surtout liés au domaine de la défense (volet militaire). **Ils revêtent aujourd'hui une grande importance suite au futur réarmement de l'Europe imposé par la géopolitique actuelle (mars 2025).**

Pour atteindre l'objectif « zéro émission nette » qui va nécessiter des quantités gigantesques de métaux critiques, la Commission européenne n'a d'autre solution que de relancer l'activité minière en réexploitant d'anciennes mines, en en ouvrant de nouvelles et en élargissant ou approfondissant les mines actuelles. Les quantités de métaux critiques requises sont énormes et l'Europe, notre continent, ne les a pas, faute d'un contexte géologique favorable. L'Europe est en réalité un « nain minier » à l'échelle mondiale. **Nous sommes 6% de la population mondiale, nous consommons 25 à 30% de la production et n'en produisons que 5% pour assurer nos besoins.** Nous nous plaçons, depuis les années 1990, au dernier rang des efforts d'exploration avec seulement 3%, nous sommes loin derrière les compagnies anglo-saxonnes et asiatiques qui dominent non seulement l'exploration mais également la production. Nos réserves sont faibles

face à l'enjeu. Seuls 2% des métaux dont nous avons besoin pour la transition énergétique sont disponibles sur le continent européen (CDS, 2023) [9].

Alors, comment réaliser la transition énergétique si l'on n'a pas les matériaux pour la réaliser ? La Commission a édicté 4 règles afin de remédier à notre faiblesse :

(i) produire dans l'Union européenne 10% de notre consommation annuelle (autrement dit : cela revient à dépendre de 90% de l'extérieur !) ;

(ii) transformer sur place au moins 40% de notre consommation annuelle ;

(iii) recycler au moins 15% de métaux pour notre consommation annuelle et

(iv) ne pas dépendre à plus de 65% d'un pays pour s'affranchir d'une criticité trop élevée.

À ce jour, aucune de ces recommandations n'est respectée. L'Europe privilégie aussi le développement d'une économie circulaire à raison de 75%, à ce jour elle est d'un peu moins de 12% et a diminué au cours des années récentes.

L'Europe est donc face à un énorme défi. Elle devra aussi tenir compte du fait qu'extraire des métaux nécessite beaucoup d'énergie. Aujourd'hui, cette énergie représente 12% de l'énergie primaire mondiale, assurée par l'énergie fossile, et va croître de 9% par an pour satisfaire les besoins en métaux.

Extraire des métaux requiert aussi de grandes quantités d'eau avec des éléments chimiques souvent toxiques afin de récupérer les métaux du minerai.

Extraire des métaux est polluant et produit généralement >95% de déchets (« les stériles ») non valorisables. On voit que les mines dites « responsables » laissent encore beaucoup de place au doute. De plus en plus de déchets sont à prévoir, les teneurs des gisements étant basses, car ce sont les gisements à plus fortes teneurs qui furent d'abord exploités.

Quantification des ressources nécessaires

Les besoins en matériaux critiques pour les équipements bas-carbone sont bien identifiés et gigantesques [10, 11, 12]. Citons :

- pour une voiture électrique Tesla, 1 à 4 kg de terres rares ou REE (= *Rare Earth Elements*), 80 kg de lithium (Li), 60 kg de cuivre (Cu), 50 kg de graphite… (à l'échelle mondiale, cela demande 69 fois plus de nickel (Ni), 50 fois plus d'aluminium (Al), 40 fois plus de cuivre (Cu), 31 fois plus de cobalt (Co), 28 fois plus de manganèse (Mn)…). Les batteries NMC sont très gourmandes en nickel, manganèse, cobalt, lithium, graphite. Des batteries LFP (lithium, fer, phosphate) moins performantes et moins chères de 20 à 30 % sont actuellement développées par la Chine,
- pour un smartphone qui pèse 200 gr il faudra 200 kg de minerai dont 3 g de néodyme (Nd), pour les aimants, et de l'indium (In) sous formes d'oxydes pour l'aspect tactile de l'écran, également de l'or à des concentrations 100 fois supérieures par rapport au minerai. **Au total, un smartphone renferme plus de 60 métaux représentant 40% de son poids.** Ces métaux ne sont pas recyclables à des prix compétitifs,
- les moteurs des voitures électriques et les éoliennes sont très consommateurs de terres rares dans les aimants. Une éolienne de 3MW (120 m de haut) nécessite 3 tonnes d'aluminium (Al), 2 tonnes de terres rares (REE), 4,7 tonnes de cuivre (Cu), 335 tonnes de fer (Fe) et 1200 tonnes de béton,
- le photovoltaïque solaire nécessite principalement de l'argent (Ag) (12% de la demande mondiale en 2022 [13], de l'aluminium (Al), de l'indium (In), du bismuth (Bi) et du silicium (Si) [14]. Bien que ce dernier soit géologiquement abondant, il est considéré comme critique suite à la dépendance chinoise après purification métallurgique.

Il faudra ainsi extraire 5 à 10 fois plus de métaux que la production actuelle pour alimenter le renouvelable bas-carbone, **ce qui revient à extraire en 25 ans (échéance 2050) plus de métaux que dans l'histoire humaine depuis ses débuts il y 2500 ans, pour une Europe à 100% de véhicules électriques.** La compétition pour les ressources sera énorme, d'autant plus que 60 pays se sont engagés sur la même voie, à savoir atteindre la neutralité carbone en 2050 (Figure 2).

Finalement la mobilité électrique et les réseaux électriques vont engloutir la majorité des métaux ! La majorité des véhicules électriques et hybrides fabriqués en 2023 sont des SUV, 40% en Europe, 40% en Chine, 60% aux USA auxquels s'ajoutent pour chaque entité 20% de voitures plus grandes et des crossovers (IEA, 2024) [15]. Certains diront « tout ça pour ça ! ». À l'évidence, la réduction des consommations ou le ralentissement de nos économies ne sont envisagés ni par l'Agence internationale de l'énergie (IEA) ni par l'Europe.

Mais revenons aux besoins en métaux tels qu'ils résultent des accords de Paris (Figures 3 et 4, KUL, 2022) [16] pour une technologie « clean » en 2050.

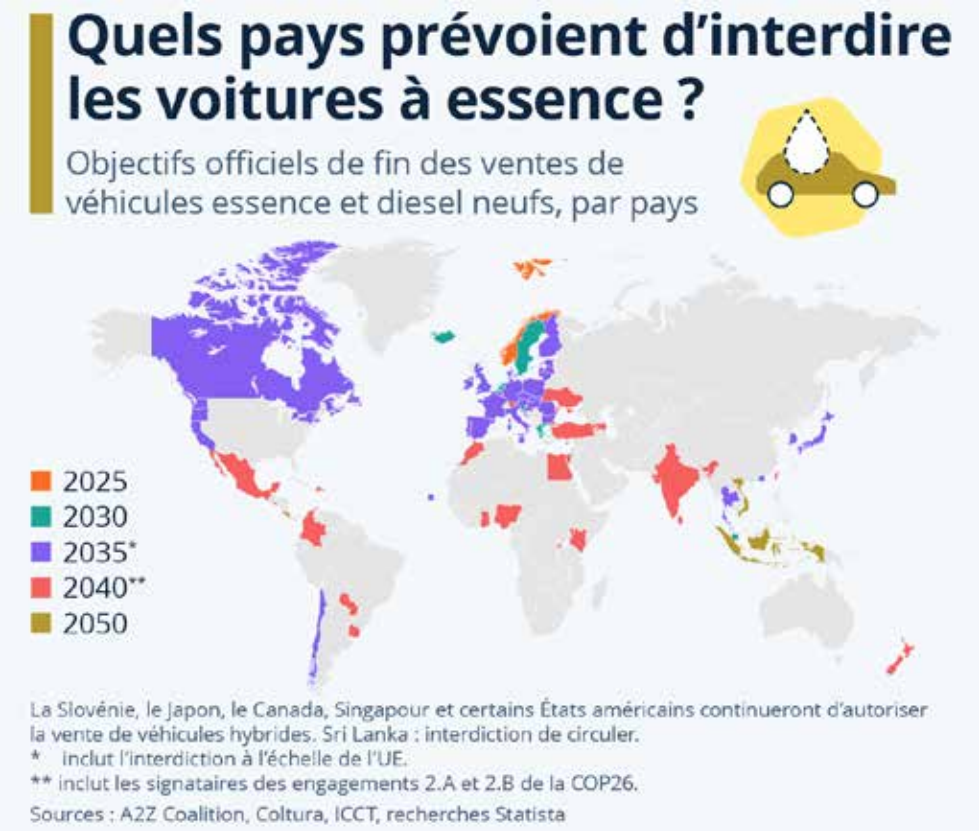


Figure 2 : Agenda pour le passage aux voitures électriques dans 60 pays engagés dans la transition (source : https://fr.statista.com/infographie/32693/interdiction-vehicules-essence-et-diesel/. Juillet 2024.

Lithium : x 60 en 2050

L'Europe n'assure actuellement que 0 à 30% (en moy : 5%) de sa demande. Parmi les 200 plus grandes compagnies minières, seules 17 ont des projets miniers en Europe.

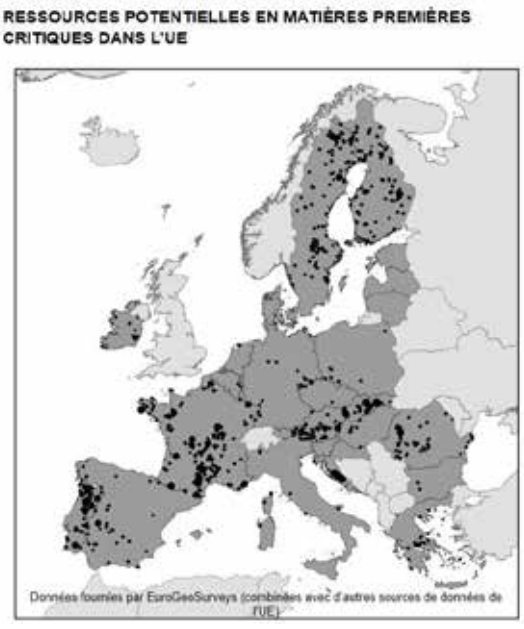
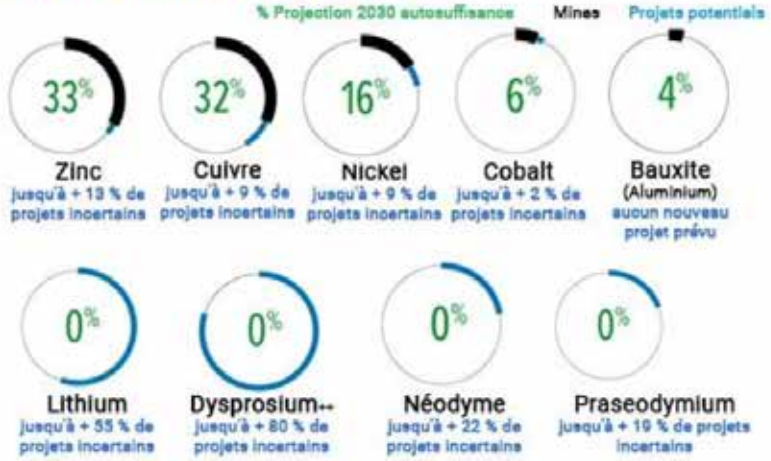


Figure 3 : Besoins en métaux pour assurer le « zéro émission nette » en 2050.
L'Europe n'a pas les quantités requises et devra ouvrir des mines après ré-examen de son potentiel minier (cercles noirs, figure à droite). Sources : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474
https://eurometaux.eu/media/20ad5yza/2022-policymaker-summary-report-final.pdf

GRESEA ÉCHOS N. 118 *MÉTAUX CRITIQUES : QUAND L'EUROPE MINE SA TRANSITION*

Figure 1. **Autosuffisance de l'UE pour certains métaux nécessaires aux technologies domestiques (en 2030), avec l'impact théorique de nouveaux projets inclus.**



Source : *Metals for Clean Energy. Pathways to solving Europe's raw materials challenge*, KU Leuven report for Eurometaux, 2022. En ligne.

Figure 4 : Autosuffisance de l'Union européenne pour certains métaux.
L'autosuffisance est faible et pourrait être améliorée grâce aux développements de projets dits « incertains ».
Pour le lithium, 28 projets sont en cours (Serbie, Alsace, Portugal, Tchéquie…).
Une production test a été menée en Allemagne (novembre 2024) à partir de saumures à 165 °C à 2 km de profondeur.
Production espérée de 240 000 tonnes d'hydroxyde de lithium (LiOH)/an, soit 10% de la demande de l'Union européenne, à partir de 2027.

Ils sont compris dans une fourchette de 45 millions de tonnes jusqu'à 75 millions de tonnes (pour une politique plus ambitieuse). C'est surtout l'aluminium (Al) et le cuivre (Cu) qui dominent (30-35% de la demande actuelle), ensuite lithium (Li), cobalt (Co) et terres rares (REE). L'Union européenne aura besoin de 26 fois plus de terres rares qu'aujourd'hui pour atteindre la neutralité carbone en 2050

Face à cet énorme enjeu, le domaine privé est incapable de financer la relance minière en Europe et les États devront suppléer à concurrence de centaines de millions jusqu'à un milliard d'euros (en Allemagne par exemple, *in* Rico, 2023) [17]. De plus, il s'agit de projets à risques et l'Europe ne dispose pas de compagnies « majors ». Aujourd'hui, seules 17 des 200 plus grandes compagnies minières opèrent en Europe, surtout pour le cuivre (Cu). Elles ont des projets pour le lithium (Li), le cobalt (Co) et le nickel (Ni). Pourquoi si peu de compagnies ? Principalement pour des raisons environnementales et oppositions des populations locales. La mine n'a pas bonne réputation… surtout en Europe.

Les mines dans le monde et la demande énergétique

Extraire des métaux va demander beaucoup d'énergie et d'eau liée à l'extraction, à la concentration, à la pyrométallurgie, au raffinage et au stockage des déchets (en mer, dans des vallées, etc.). Rappelons que la production d'énergie primaire mondiale a été assurée à 83% par le fossile en 2023 et que l'électricité mondiale a été produite à 36% par le charbon, en augmentation de 1,4% par rapport à 2022. **L'Union européenne prévoit un mix électrique de moins de 20% d'énergie fossile pour 2030 et de 80%** à partir des énergies renouvelables (éolien et solaire). En 2023, le mix énergétique européen est de 1/3 de fossile et 2/3 de bas-carbone dont 23% de nucléaire. L'Europe part aussi en ordre dispersé dans la réalisation de l'objectif « zéro émission nette », ce qui ne facilite pas la tâche (Figure 5).

L'extraction des matériaux dans le sol et le sous-sol est passée de 27,1 milliards de tonnes (Gt) en 1970 à environ 100 milliards de tonnes en 2022. Les métaux représentent un peu moins de 1/5^{e} (17,3 milliards de

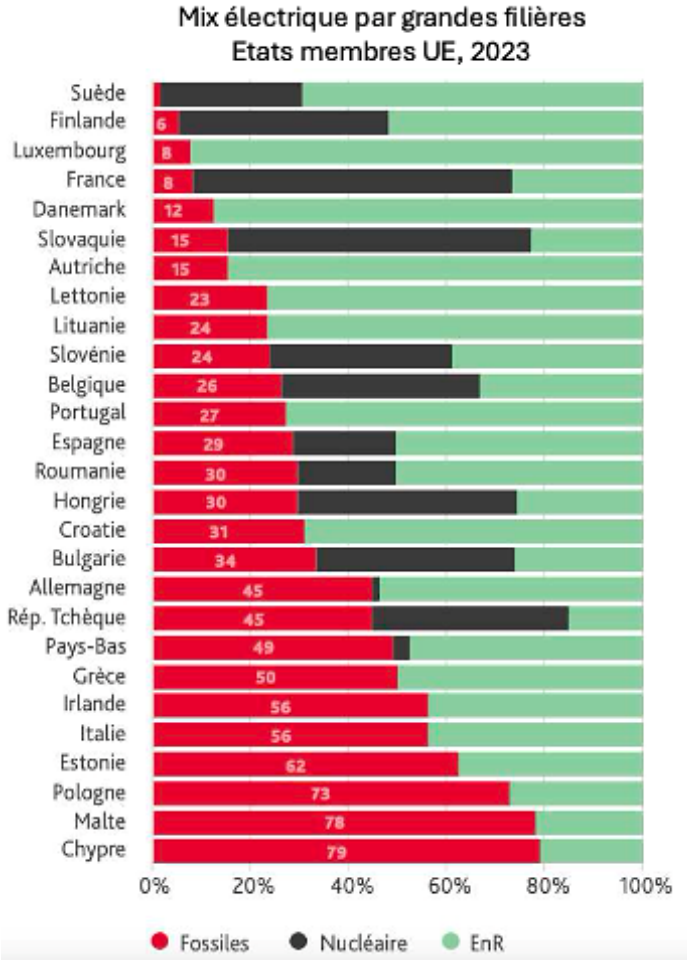


Figure 5 : Part des différentes énergies dans le mix électrique des pays de l'Union européenne. Le mix se composait en 2023 d'un tiers d'énergie fossile (gaz 17%, charbon 12%, autres 3%) et deux tiers d'énergies bas-carbone (nucléaire 23%, éolien 18%, hydroélectrique 12%, solaire 9%, autres 6%). La disparité est liée aux différents contextes géologiques, et historiquement à des décisions de politique énergétique.

tonnes en 2020) et, avec la transition programmée, une augmentation de 5 à 10 fois la production minière est à attendre pour 2050. Il s'agit d'un véritable challenge ! Est-il réaliste, sachant que l'extraction minière et métallurgique représente aujourd'hui 12% de la consommation mondiale d'énergie primaire, qu'elle augmente de 9%/an et dépende principalement de l'énergie fossile ? À nouveau une quadrature du cercle ?

On passe finalement d'un « ancien » monde utilisant quelques éléments chimiques du tableau de Mendeleïev, facilement exploitables, à un « nouveau monde », nécessitant de nombreux éléments chimiques en grandes quantités et difficilement exploitables. De nombreux éléments sont requis à la fois pour la transition énergétique et numérique, engendrant une complexité des chaînes d'approvisionnement et des risques de conflits d'usage par exemple dans l'aérospatial militaire, dans l'industrie de l'armement … (voir les « métaux stratégiques » tels que l'aluminium (Al), le titane (Ti), le tungstène (W)…).

Tout cela a bien évidemment un coût. L'Agence internationale de l'énergie (IEA) estime le coût de la transition énergétique européenne à 1 300 milliards de dollars/an de 2021 à 2030, ensuite 1 540 milliards de dollars/an jusqu'en 2050. L'objectif pour 2030 (c'est-à-dire demain) est une diminution de 55% des gaz à effet de serre par rapport à 1990, pour atteindre le Net-Zéro carbone en 2050. Christine Lagarde (BCE) va plus loin, dans le *Financial Times* du 7/11/2024, ce sont 11 000 milliards de dollars/an que le monde doit investir, soit 10% du PIB mondial ! Est-ce réaliste ?

Quelle est la situation minière à l'échelle mondiale ? Au moins 34 820 mines ont été recensées par satellite en 2022, représentant une surface de 101 583 km^2 (Figure 6), auxquelles il faut ajouter 20% de mines souterraines. Elles utilisent 45 millions de personnes souvent dans des conditions sociales peu favorables. Plus de la moitié (52%) de la surface minière est située dans 6 pays seulement (Russie, Chine, Australie, USA, Indonésie, Brésil), ensuite 21 pays couvrent 39 % de la surface minière et 118 pays en couvrent 9%. L'Europe est la grande absente, seules l'Ukraine et l'Allemagne sont dans la dernière partie (et en bas) de la troisième catégorie (Figure 6).

Les coûts d'exploration de l'Europe représentent moins de 5% des investissements mondiaux d'exploration et sont les plus bas à l'échelle internationale depuis les années 1990. La situation est donc critique, d'autant plus qu'à l'échelle mondiale il y a un ralentissement de l'effort d'exploration (pour les métaux non ferreux), avec une baisse d'environ 5% en 2024 par rapport à 2023. On est passé de 70 008 forages en 2022 à 53 582 en 2023. Seul le lithium a connu une importante augmentation des projets forés en 2022. Cette mauvaise situation est liée à un contexte géopolitique incertain, à l'inflation (et récession dans certains pays), aux nombreuses études non abouties (= expectatives). **Finalement, les groupes miniers préfèrent investir dans l'amélioration des rendements de gisements existants.** L'activité minière est une activité à risques : 1% des projets miniers est rentable à long terme, sur 1 000 dépôts découverts, un ou deux deviennent des mines et sur dix mines productrices, deux ou trois feront faillites. Rappelons que le temps de la mine

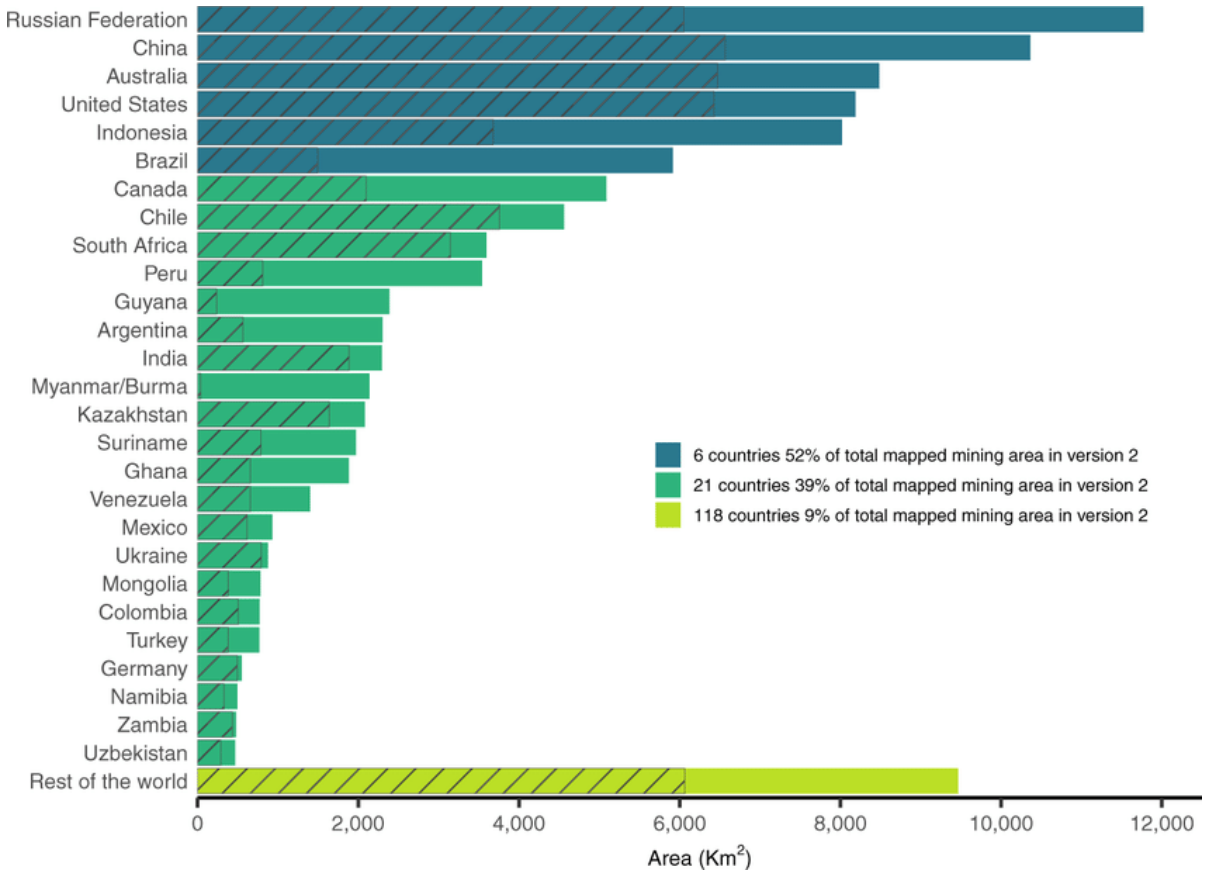


Figure 6 : La surface minière mondiale reconnue par satellite en 2022 est d'un peu plus de 100 000 km2 pour environ 35 000 mines répertoriées. Six pays (Russie, Chine, Australie, USA, Indonésie, Brésil) occupent un peu plus de 50 % de la surface. L'Europe est à peine représentée dans la troisième catégorie (petites surfaces) avec l'Allemagne et l'Ukraine) [18].

est un temps long, 145 des 228 dépôts de cuivre (Cu) identifiés en 1990 ne sont toujours pas en production, 35 ans après leur découverte.

Il est donc nécessaire que l'Europe (r)ouvre des mines, et qu'elles soient *responsables, durables, clean ou vertes* suivant le nouveau discours qui supporte la relance européenne.

Une ONG (Responsible Mining Fondation, 2012) [19] a analysé les pratiques minières (>250 mines) : une mine est « responsable » si les informations de base sont publiques/si les lois du pays sont respectées/si le respect des droits humains est effectif/si les normes environnementales sont respectées. Pour cette ONG, c'est rarement le cas, surtout dans les pays du Sud. **L'Europe échappe-t-elle à ce constat? Non** car elle importe sans cesse des métaux des pays du Sud (sans grand souci de ce qui s'y passe…), non car elle doit sacrifier des zones pour stocker les déchets de plus en plus volumineux (suite à la baisse des teneurs), non car elle abaisse les normes environnementales. La mine de cuivre Rio Tinto en Andalousie est un exemple, avec rehaussement d'une digue minière à proximité d'une rupture de barrage et prélèvement d'eau dans une région touchée par la sécheresse….

Cette « liberté environnementale » est possible au nom de la sécurité nationale et de l'intérêt public. Ce n'est pas un cas isolé…

Des mines pour sauver la planète… ?

Les mines partent avec une mauvaise réputation tout simplement car les opérations qui y sont liées sont visibles (dégradations de paysages, stockage des déchets, poussières…) et polluantes (utilisation d'éléments toxiques pour récupérer les métaux du minerai…). La situation risque de s'aggraver, par exemple pour les déchets (= stériles, = *tailings*) qui seront de plus en plus volumineux car les teneurs des gisements sont de plus en plus faibles. On a en effet d'abord exploité les gisements les plus faciles à plus fortes teneurs (la teneur moyenne du minerai du cuivre chilien a diminué de 30% ces 30 dernières années en suivant une règle quasi générale dans ce domaine). Le cuivre de la mine Rio Tinto en Espagne est récupéré à partir de la chalcopyrite ($CuFeS_2$, avec Cu = 34,5%). Le

gisement contient 0,4% de chalcopyrite, laissant donc 99,6% de déchets à stocker. Initialement, le minerai facilement accessible renfermait 2% de chalcopyrite. **Les bonnes parties du gisement épuisées, il est passé à 0,4%, ce qui a nécessité au début du XX^{e} siècle 17 fois plus d'énergie (fossile) et a augmenté le volume des déchets de 75 fois.** Les teneurs en métaux critiques diminuant, il est nécessaire d'approfondir et / ou d'élargir les mines, à moins de bénéficier d'avancées technologiques.

Les réserves et la production

L'Europe est dépendante à plus de 90% pour 51% des métaux (Figure 3) pour la transition carbone et, pour certains (lithium, cobalt, REE…), elle l'est de manière « critique ». Cette situation est d'autant plus préoccupante qu'en 1992 les trois quarts des métaux étaient consommés par les pays développés, alors que depuis 2012 ce sont les pays du Sud qui consomment les trois quarts des métaux tout en possédant les gisements avec les meilleures teneurs. La concurrence ne peut qu'être rude dans ce contexte où nous n'avons pas beaucoup de réserves. **La géologie nous est défavorable, la plupart des métaux sont généralement liés à des boucliers et aires cratoniques de la partie supérieure de la lithosphère :** il s'agit de croûtes continentales stabilisées depuis longtemps (milliards d'années pour les premiers, centaines de millions d'années pour les secondes) constituées de roches magmatiques (granites, granodiorites…) et métamorphiques (gneiss, amphibolites…) porteuses de métaux (y compris les REE). En Europe, nous sommes à nouveau mal lotis et ne pouvons seulement compter que sur les boucliers précambriens scandinave (ou baltique) et ukrainien.

Les métaux, à l'échelle mondiale, sont principalement produits à partir des grands boucliers sino-coréen, nord-américain, Brasiliano Sao Francisco, ouest-africain pour les plus importants. **Sur les 31 matériaux critiques européens, nous dépendons à plus de 50%, pour 25 d'entre eux, de la Chine.** Une étude de Grésea Echo [20] a estimé notre autosuffisance en 2030 pour certains métaux nécessaires pour la transition, ce qui donne 33% pour le zinc (Zn), 32% pour le cuivre (Cu), 16% pour le nickel (Ni), 6% pour le cobalt (Co), 4% pour l'aluminium (Al) et 0% pour le lithium (Li), le dysprosium (Dy), le néodyme (Nd), le praséodyme (Pr). L'Europe a lancé des projets dits « incertains » qui devraient augmenter ces autosuffisances respectivement de +13%, +9%,+9%, 2%, +55%, +80%, +22% et +19% (Figure 4).

Suite aux conditions géologiques, dressons le tableau dans ses grandes lignes de l'origine des métaux, donc des réserves. Par ordre d'importance décroissante, on a :

(1) Chine et Amérique latine,
(2) USA - Russie - Australie,
(3) Canada.

Pour la production des 10 métaux ou familles de métaux les plus produits en 2020 [21], on a :
(1) CHINE - Afrique - Australie - (Corée du Nord) - Amérique latine,
(2) Russie - USA - Turquie - (Israël - Maroc - Japon - Inde).

L'Europe est absente. **En prenant ensemble réserves et production, le constat est clair : la Chine domine, elle a le quasi-monopole sur les minerais critiques** [22], (Figure 7).

Les terres rares ou REE (Rare Earth Elements)

Les terres rares occupent constamment le devant de la scène (cf. l'Ukraine et la Présidence de Donald Trump, 2024) car sans elles, pas de transition verte. Dans le tableau de Mendeleïev, elles correspondent à la série des lanthanides (n° atomique 57 à 71) à laquelle on ajoute le scandium (Sc, n° atomique 21) et l'yttrium (Y, n° atomique 39), de propriétés chimiques très voisines. On distingue les terres rares légères (LREE, n° atomique 54 à 64) et lourdes (HREE, n° atomique 65 à 71) (Figure 8). Elles sont présentes dans un peu plus de 200 minéraux sous forme d'oxydes. Elles sont assez répandues, malgré leur nom (elles doivent leur nom à la rareté des gisements localisés), surtout dans les roches magmatiques et volcaniques et leurs produits d'altération. Elles sont présentes le plus souvent en faibles concentrations.

L'extraction des REE et leur raffinage sont très polluants car elles sont souvent associées à de l'uranium (U) et du thorium (Th), radioactifs. Elles nécessitent de nombreuses opérations chimiques impliquant des acides. **Les terres rares lourdes (HREE) sont produites uniquement en Chine, ce pays ayant ainsi un quasi-monopole sur ces éléments.**

Les terres rares légères (LREE) sont utilisées pour leurs propriétés magnétiques exceptionnelles, et les terres rares lourdes (HREE), qui ont le plus de valeur, par ordre d'importance décroissante, sont associées aux aimants permanents, catalyseurs, alliages métallurgiques, polissages, verres et céramiques.

Seuls 5 types de gisements sont exploités :
(1) les carbonatites (48% de la production mondiale),
(2) les argiles ioniques (36% de la production mondiale),
(3) les latérites (12%),
(4) les roches magmatiques alcalines (2%),
(5) les placers (2%).

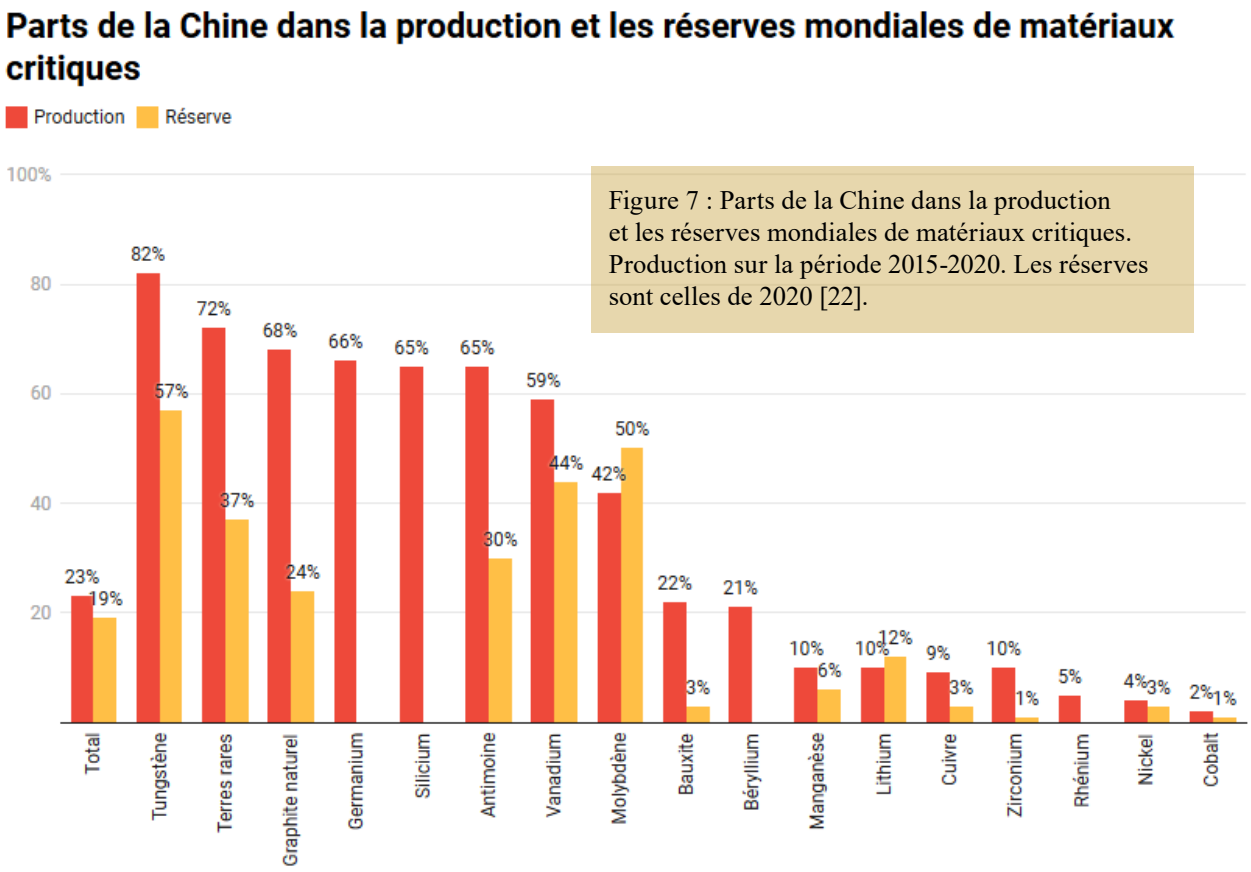
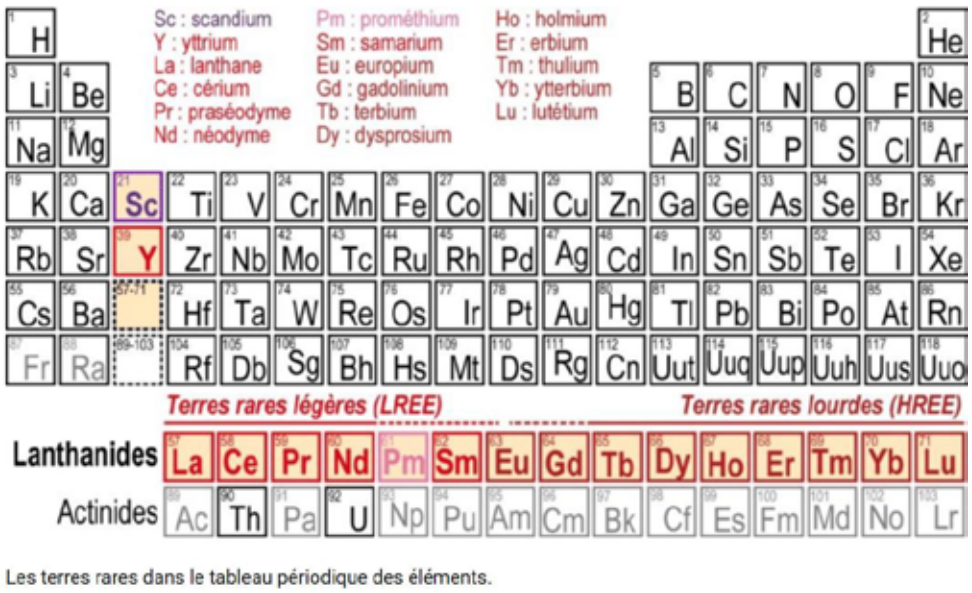


Figure 7 : Parts de la Chine dans la production et les réserves mondiales de matériaux critiques. Production sur la période 2015-2020. Les réserves sont celles de 2020 [22].



Les terres rares dans le tableau périodique des éléments.

Figure 8 : Les terres rares (REE) comprennent les éléments du groupe des 15 lanthanides, ainsi que le scandium et l'yttrium qui ont des propriétés chimiques très voisines [23].

Certaines terres rares - lanthane (La), cérium (Ce), scandium (Sc), yttrium (Y) - peuvent être aussi abondantes que le cuivre (Cu), le plomb (Pb) ou le zinc (Zn). Elles furent découvertes dès 1793 en Suède.
Leurs réserves estimées en 2023 sont de 120 millions de tonnes d'oxydes (dont 44 millions en Chine) et la production 2023 fut de 350 000 tonnes d'oxydes, principalement par la Chine. Elles sont présentes dans 34 pays mais seuls quelques-uns en produisent. Aucune mine de REE n'est présente en Europe. La plus proche est la mine russe de Lovozero-Khibina. Un gisement a récemment (2023) été découvert en Suède (gisement de Per Geijer, en Laponie), il renfermerait 1% des réserves mondiales et la production est envisagée d'ici 10 à 15 ans. À nouveau la mine est un temps long…

Les grands fonds océaniques contiennent d'importantes quantités de REE dans des boues, avec des teneurs de 500 à 2000 ppm, bien supérieures à celles des gisements terrestres (< 190 ppm). Cent gigatonnes au moins seraient présentes, donnant un réservoir de réserves de plus de 500 ans. Aujourd'hui ces boues, également très riches en métaux - cuivre (Cu), nickel (Ni), cobalt (Co), manganèse (Mn) - ne sont pas exploitées car les impacts environnementaux et sur la biodiversité ne sont pas connus. Des réserves de même type sont présentes dans les grands fonds nord-atlantiques mais un moratoire européen empêche même de les explorer. Pourtant, le Japon va exploiter en 2025 une partie de ces grands fonds autour de Minamitori à > 5km de profondeur. Son objectif est de réduire sa dépendance vis-à-vis de la Chine.

Les programmes géologiques en Europe

Étant très vulnérable et dépendante à plus de 90% pour les métaux et les REE, et avec moins de 1% des réserves mondiales, l'Europe a lancé dès 2018 plusieurs programmes d'estimation de son potentiel en éléments critiques : citons Mineral4EU, EURare [24] (Figure 9), Comes, Mima, ERA-MIN, ERECON… Ces programmes ont montré que l'Europe a un bon potentiel en REE, surtout au Groenland.

Mais aujourd'hui il n'y a pas de certitude sur la viabilité économique de l'exploitation des REE en Europe. Les études économiques sont trop peu nombreuses et les compagnies hésitent à investir car un des points clés est l'équilibre entre la technologie extractive et l'impact environnemental. Le gouvernement groenlandais a interdit l'exploitation des REE car elles contiennent des éléments radioactifs. Pour rappel, Donald Trump avait voulu acheter le Groenland lors de son premier mandat en 2016 et revient sur ce point en 2025 avec son deuxième mandat. Outre les REE et les métaux, le Groenland occupe une position géostratégique (convoitée par la Russie et la Chine) liée aux nouvelles routes maritimes qui se créent avec le réchauffement climatique. Le bouclier baltique est aujourd'hui un "Arctic Land Rush" car il contient uranium (U), fer (Fe), nickel (Ni), phosphore (P), cuivre (Cu), REE… De nombreuses mines y existent depuis longtemps et plusieurs projets (par exemple EURare [24]) sont en cours dans le bouclier baltique (Finlande, Suède, Norvège …).

Des programmes existent aussi partout en Europe (Portugal, Espagne, France, Allemagne, Serbie….) pour toute une série de métaux, dont 28 programmes seulement pour le lithium.

Malgré tout, le potentiel en métaux européen est insuffisant et nous devrons diversifier les sources d'approvisionnement, ré-utiliser les déchets et recycler. Nous devrons aussi retrouver la maîtrise du raffinage, entièrement aux mains de la Chine. Il nous faudrait ouvrir rapidement (moins de 5 ans, pour certains moins de 2 ans !) environ 70 mines pour le lithium et 80 pour le cuivre (AIE, 2023 [25]). Finalement, la question n'est pas tant de savoir s'il y a assez de métaux dans le sous-sol pour réaliser la transition, que de les extraire à la vitesse de développement fixée. Ce rythme est imposé par la réduction du CO_2 (« zéro émission nette ») en 2050.

Il faut en effet aller vite (pour rappel, le temps de la mine est long, égal à 17 ans), ce qui suppose des investissements risqués (science et géopolitique), avec des financements difficiles : il faut investir au minimum 180 milliards de dollars/an, soit deux fois les investissements actuels (AIE 2023).

Bien entendu le coût sera au rendez-vous sous forme d'un ajout aux secteurs traditionnels. D'autant plus qu'en ce qui concerne l'intelligence artificielle (IA) générative, sa demande en énergie s'accroît de façon exponentielle et consomme déjà 10 fois plus d'électricité que le web classique [26].

Zéro émission nette, vraiment nécessaire ?

L'Europe est donc face à un défi, a-elle mesuré l'agenda court terme qu'elle s'est fixée pour son objectif « zéro émission nette » ? Cet agenda doit intégrer la dimension minière qui se décline sur le long terme : explorer et prospecter sont des phases longues, **il faut pour rappel en moyenne 17 ans et de très gros budgets pour ouvrir une nouvelle mine**, en espérant qu'elle réponde pleinement aux attentes… De plus, suite à la situation économique et géopolitique mondiale tendue, les efforts d'exploration dans les non ferreux ont récemment diminué de quelques pourcents…

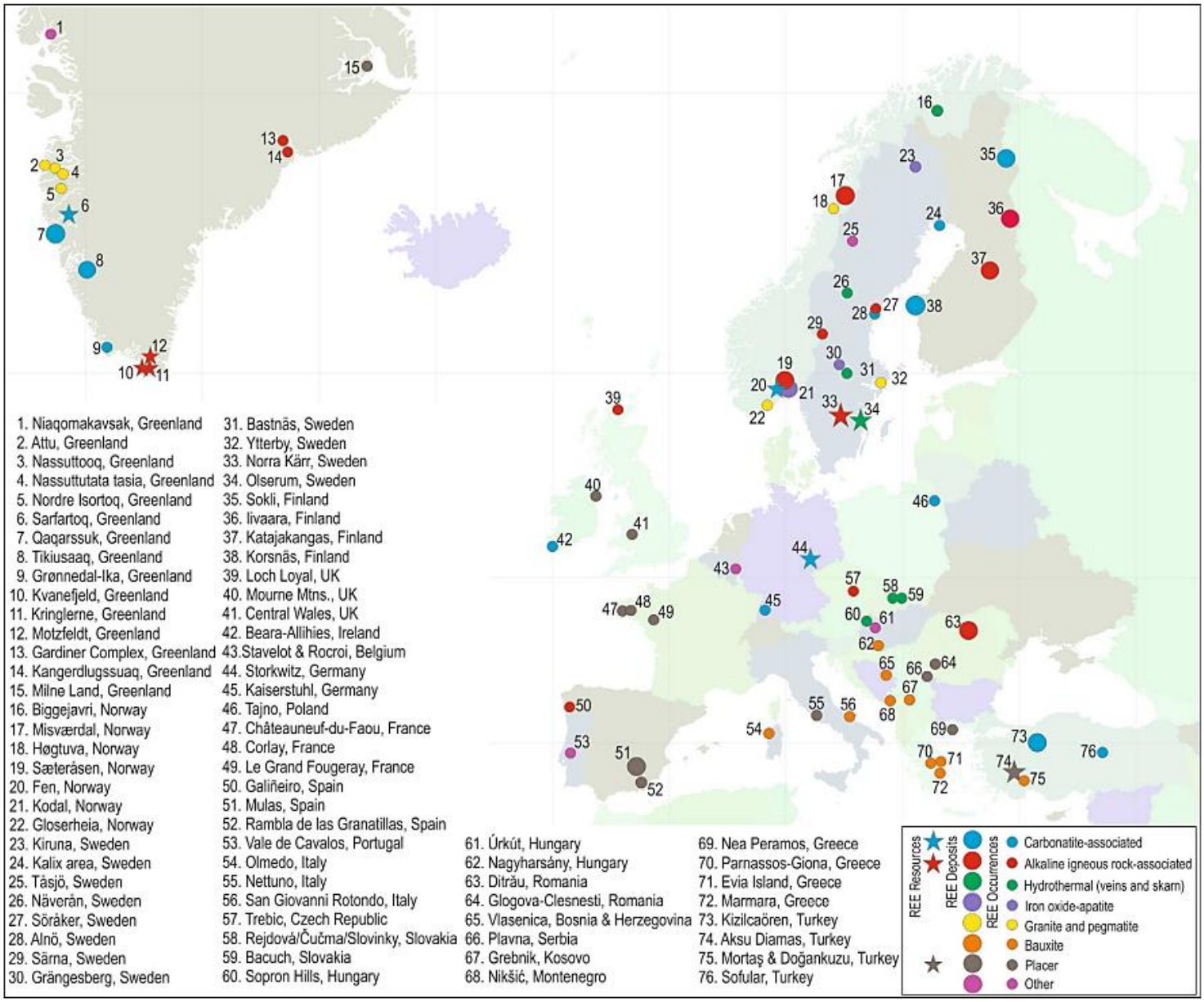


Figure 9 : Ressources, gisements et occurrences de terres rares en Europe reconnus par le projet EURARE. Les ressources sont les gisements qui ont été explorés de manière suffisamment détaillée pour faire l'objet d'estimations de ressources accessibles au public ©NERC [24].

Finalement, cette transition va remplacer une dépendance du fossile par une dépendance aux métaux, il s'agit d'une addition des ressources et sans doute de pollutions. Ce fut le cas avec les forêts : le bois était le combustible exclusif de la métallurgie depuis plusieurs siècles, il fut remplacé par le charbon au XIX^{e} siècle pour préserver les forêts. Le charbon fut ensuite remplacé par le pétrole et le gaz (moins polluants) et aujourd'hui, le fossile sera remplacé par les métaux pour préserver le climat comme demandé par la Commission européenne.

Des programmes de reconnaissance de notre potentiel minier ont été lancés, déjà dès 2018. Ils nous apprennent par exemple que nous avons un potentiel limité en terres rares. Celles-ci, ultra-dominées par la Chine, sont un pilier central des technologies dites "high tech". Nous n'avons pas de mines de terres rares.

Cette transition ne ressemble-t-elle pas à une transition à marche forcée ? Beaucoup le pensent. D'autres vont plus loin et la mettent en doute.

La conclusion est assez simple, pour une planète 100% bas-carbone, à partir de 100% d'énergies renouvelables, il faudra extraire 3 milliards de tonnes de métaux en remplacement des 15 milliards de tonnes fournies par le fossile. Cet objectif nécessite un taux de retour énergétique ERoEI ("Energy Returned On Energy Invested") de 50:1 ou plus (égale à la quantité nette à obtenir à partir des diverses énergies). Il faut également souligner que, pour de très nombreux métaux, les réserves sont inférieures aujourd'hui à la demande. Les réserves globales en métaux sont ainsi insuffisantes pour 100% de voitures électriques et de stockage stationnaire d'électricité.

Notons que le pacte vert fait la part belle aux énergies renouvelables intermittentes et non à l'énergie nucléaire, grande absente de cette thématique.

J'ai eu l'occasion de donner une conférence* à l'Université Inter-Âges de l'ULB (CEPULB) sur l'état des lieux lié à la transition, en privilégiant l'aspect géologique. Cet aspect me semble incontournable car il s'agit de métaux. Dans la conférence, j'ai rappelé la politique de la Chine dans la production des terres rares avant 2010, lorsqu'elle a verrouillé le marché en produisant à bas prix, ce qui lui était possible étant peu regardante sur les problèmes environnementaux et sociaux. Après l'embargo de 2010, suite à un contentieux avec le Japon, les différents producteurs se sont « réveillés » et ont rétabli un équilibre de production à l'échelle mondiale.

Aujourd'hui, face à la position ultradominante de la Chine à la fois au niveau de la production et de l'accaparement des réserves, il est à prévoir que les terres rares du Groenland ont peu de chances d'être produites à court terme comme le souhaite D. Trump (qui se tourne par opportunisme sur l'Ukraine et depuis mai 2025 vers les nodules polymétalliques des grands fonds). La Chine reste incontournable et est toujours capable de verrouiller le marché et de limiter toute extraction concurrente. De plus, de nombreux autres endroits sont disponibles dans le monde, hélas pas en Europe, à des prix compétitifs.

Restons donc vigilants et ne prenons pas pour argent comptant ce qui nous est « vendu » comme une évidence. Oui, la transition a une face cachée [27]. Non, les énergies vertes et le numérique ne sont pas propres. Le constater devrait ensuite permettre à chacun de consommer de manière *a minima* informée, et de relativiser cette fameuse transition écologique (énergies vertes et numérique) si propre, si durable… comme par magie !

Alain PRÉAT est géologue et professeur émérite de l'ULB.

ADDENDUM 1

L'Ukraine est au centre de l'activité internationale, surtout pour la valorisation de ses ressources. Elle contient 32 des 34 métaux critiques de la liste établie par l'Europe. De bons résumés peuvent être consultés via les références [28, 29, 30], en fin d'article.
Un carte commentée (voir figure 10), peut être consultée via la référence [31] en fin d'article. Une synthèse est disponible via ce lien : https://www.researchgate.net/publication/375766275_Geological_Resources_of_Ukraine

ADDENDUM 2

Suite au bouleversement géopolitique et à l'inquiétude de nombreuses entreprises face aux conséquences économiques du pacte vert, ce dernier fait l'objet de nombreuses interrogations, y compris de la Commission européenne.

Voir :
https://www.lesechos.fr/finance-marches/marches-financiers/pacte-vert-leurope-veut-repousser-tres-vite-les-delais-dapplication-pour-rassurer-les-entreprises-2154229

https://www.epochtimes.fr/philippe-charlez-la-ppe3-est-totalement-incompatible-avec-la-volonte-demmanuel-macron-de-reindustrialiser-le-pays-2923139.html?utm_source=fr_dujournoe&src_src=fr_dujournoe&utm_campaign=fr_dujour-2025-04-09&src_cmp=fr_dujour-2025-04-09&utm_medium=email&est=im3DuQVFREh6LN227Yt9fuELVfSRjDfUwrGlouYghztYasjv%2Fb2NKHItBq4%3D

* Le pdf de cette conférence est disponible à cette adresse : https://www.science-climat-energie.be/wp-content/uploads/2025/01/apreat_sce-_me%CC%81taux-16de%CC%81c2024.pdf

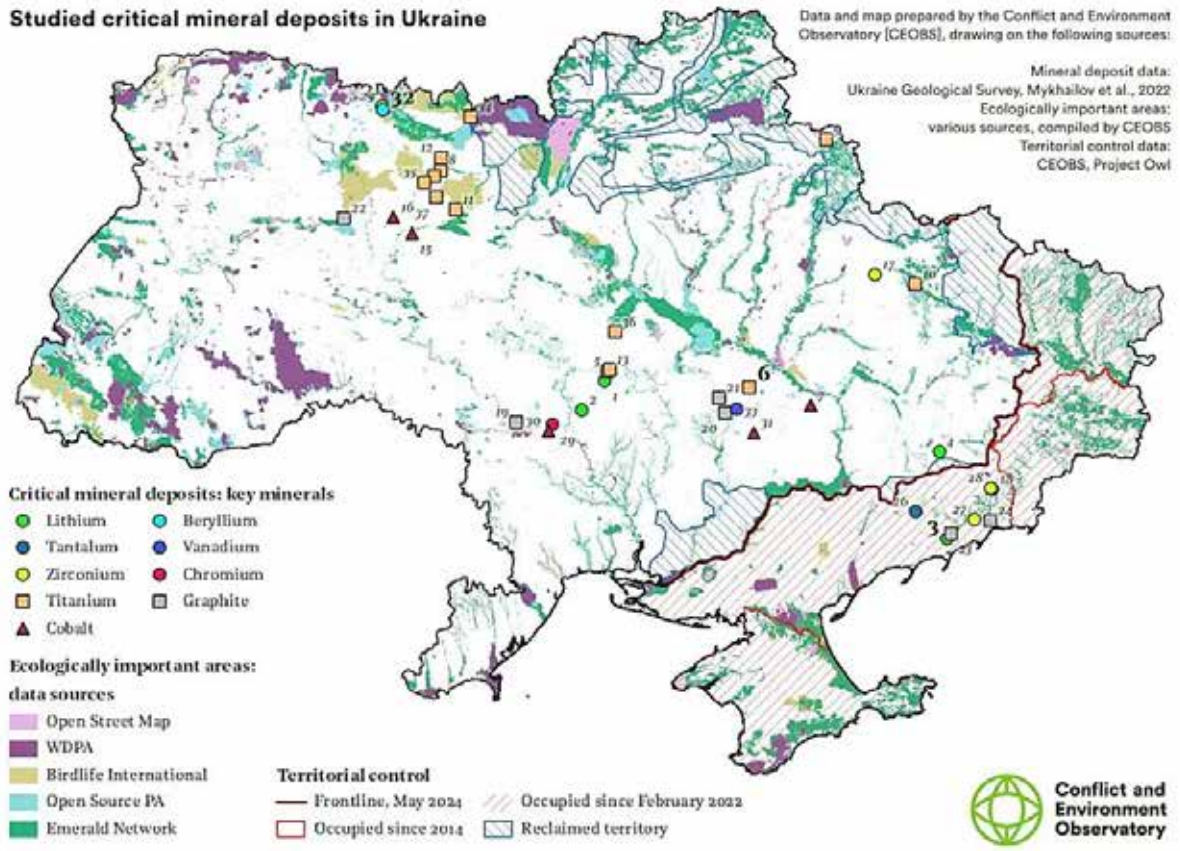


Figure 10. Localisation des minerais de l'Ukraine y compris dans les zones occupées par la Russie (situation en mars 2025). Observatoire des conflits et de l'environnement : www.ceobs.org

Références

[1] https://www.polytechnique-insights.com/dossiers/planete/comment-reduire-lempreinte-carbone-du-numerique/la-sobriete-numerique-impose-de-changer-de-modele-economique/
[2] https://www.basel.int/default.aspx
[3] https://www.linkedin.com/in/laurenroman/
[4] http://www.parismatch.com/Actu/Environnement/Un-lac-devenu-toxique-a-cause-des-smartphones-975595
[5] https://theconversation.com/comment-la-chine-a-pris-le-controle-du-marche-des-terres-rares-69967
[6] https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr
[7] https://fr.wikipedia.org/wiki/Conférence_de_Paris_de_2015_sur_les_changements_climatiques
[8] https://climat.be/2050-fr
[9] https://www.connaissancedesenergies.org/minerais-et-metaux-defi-majeur-de-la-transition-energetique-face-une-croissance-sans-precedent-240924#:~:text=Une%20transition%20énergétique%20
[10] Izoard C., 2024. *La ruée minière au XXIè siècle. Enquête sur les métauw à l'ère de la transition.* Seuil.
[11] Pitron, G. 2018. *La guerre des métaux rares. La face cachée de la transition énergétique et numérique.* LLL Les liens qui libèrent.
[12] Hache E. et Louvet B. 2023. *Métaux, le nouvel or noir. Demain la pénurie ?* Ed. du Rocher.
[13] https://silverinstitute.org/silver-supply-demand/
[14]https://solairepv.fr/les-modules-pv-utilisent-ils-des-materiaux-critiques/
[15] https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024
[16] https://eurometaux.eu/media/20ad5yza/2022-policymaker-summary-report-final.pdf
[17] https://www.investigate-europe.eu/posts/mining-minerals-not-european-business
[18] https://www.researchgate.net/publication/362177617_An_update_on_global_mining_land_use
[19] https://www.responsiblemines.org/wp-content/uploads/2017/06/Annual-Report-ENG.compressed.pdf
[20]https://gresea.be/Metaux-critiques-quand-l-Europe-mine-sa-transition
[21]https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/04/raw-materials-critical-for-the-green-transition_85a69007/c6bb598b-en.pdf
[22] https://legrandcontinent.eu/fr/2023/03/21/10-points-sur-les-metaux-strategiques/
[23] https://www.researchgate.net/publication/349642898_Ressources_en_terres_rares_de_l%27Europe_et_du_Groenland_un_potentiel_minier_remarquable_mais_tabou
[24] https://www.eurare.org/docs/EURAREbrochure_vfinal.pdf
[25]https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023?language=fr
[26] https://www.epochtimes.fr/limpact-environnemental-de-lia-generative-et-les-solutions-envisagees-2862829.html
[27] https://www.systext.org/node/1568
[28] https://www.epochtimes.fr/lenjeu-strategique-des-terres-rares-dans-la-guerre-en-ukraine-2881710.html?utm_source=copy-link-btn
[29] https://www.epochtimes.fr/vladimir-poutine-offre-aux-etats-unis-des-terres-rares-et-de-laluminium-russes-2881955.html?utm_source=copy-link-btn
[30] https://www.revueconflits.com/carte-les-ressources-de-lukraine-en-minerais-strategiques/?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=l_industrie_pharmaceutique_chinoise_loin_de_la_medecine_traditionnelle&utm_term=2025-02-26
[31] https://theconversation.com/whats-so-special-about-ukraines-minerals-a-geologist-explains-251551