

Le rôle des matériaux critiques dans la transition énergétique

Défis et opportunités

MENTIONS LÉGALES

ÉDITRICE ET CONTACT

Académies suisses des sciences (a+) • Commission élargie de l'énergie
Maison des Académies • Laupenstrasse 7 • Case postale • 3001 Berne • Suisse
+41 31 306 93 52 • urs.neu@scnat.ch • energie.akademien-schweiz.ch/fr • [✉ @academies_ch](https://www.instagram.com/academies_ch)

PROPOSITION DE CITATION

Noailly et al. (2024)
Le rôle des matériaux critiques dans la transition énergétique. Défis et opportunités.
Swiss Academies Reports 19 (3)

AUTEURE

Joëlle Noailly, Geneva Graduate Institute

CONTRIBUTEURS ET CONTRIBUTRICES

Christian Bauer, Institut Paul Scherrer • Xaver Edelmann, World Resources Forum • Tobias Haller,
Université de Berne • Christian Holzner, Académie suisse des sciences techniques •
Alessandra Hool, ESM Foundation • Vanessa Schenker, EPF de Zurich • Patrick Wäger, EMPA

RÉDACTION

Urs Neu, chef de la Commission élargie de l'énergie

TRADUCTION

Translingua

MISE EN PAGE

Olivia Zwygart, SCNAT

PHOTO DE COUVERTURE

stock.adobe.com/Philip (généré par l'IA)

1^{er} tirage, 2024

ISSN (en ligne) 2297-1823

DOI: doi.org/10.5281/zenodo.12168431



Avec la présente publication, les Académies suisses des sciences contribuent à l'ODD 7:
«Garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes, à un coût abordable».

> sustainabledevelopment.un.org

> eda.admin.ch/agenda2030/de/home/html

Le rôle des matériaux critiques dans la transition énergétique

Défis et opportunités

Le présent rapport résume les risques accrus liés à l'approvisionnement international en matériaux critiques pour la transition énergétique, examine les éventuels impacts, défis et opportunités, et formule des recommandations pour la Suisse.

Contenu

Principaux messages	3
1 Considérations internationales.....	5
1.1 Introduction : inquiétudes quant à l’approvisionnement international en matériaux critiques.....	5
1.2 Concentration de l’exploitation minière et de la transformation dans quelques pays	5
1.3 Risques d’approvisionnement différents.....	7
1.4 Effets néfastes de l’exploitation minière sur l’environnement local	8
1.5 Réduction des risques d’approvisionnement	9
2 Défis et opportunités pour la Suisse.....	10
2.1 Défis pour la Suisse.....	10
2.2 Rôle du secteur suisse du négoce de matières premières	11
2.3 Opportunités pour l’économie circulaire et l’innovation technologique	12
3 Recommandations	13
3.1 Options politiques et recommandations finales	13
Références.....	15

Principaux messages

1. La Suisse est fortement dépendante des importations

- La forte expansion des technologies (panneaux photovoltaïques [PV], batteries pour voitures électriques, pompes à chaleur, etc.) suscite des inquiétudes croissantes quant à la disponibilité de matériaux qui sont essentiels pour la transition énergétique et qui présentent un risque d'approvisionnement élevé (p. ex., le lithium, le cobalt, le nickel) (voir chap. 1.1). L'augmentation rapide de la demande en minéraux et matériaux critiques pourrait entraîner des pénuries d'approvisionnement, même pour les produits semi-finis et finis, ainsi qu'une hausse des coûts. Cela pourrait se répercuter sur les coûts des entreprises suisses qui développent ces technologies et fabriquent des produits finis (chap. 2.2).

Recommandation

- Élaborer un aperçu plus spécifique des besoins en minéraux critiques.

2. Les risques de dépendance sont plus d'ordre géopolitique que physique

- Les risques d'approvisionnement ne sont pas dus principalement à une pénurie physique mondiale, mais à des aspects et risques géopolitiques tout au long de la chaîne d'approvisionnement (chap. 1.1). Le fait que l'extraction et la transformation des matières premières sont généralement concentrées dans un petit nombre de pays constitue un problème géopolitique majeur. La Chine, en particulier, occupe une position dominante sur de nombreux marchés, notamment celui des terres rares, où elle contrôle la majeure partie de la chaîne d'approvisionnement. L'UE dépend presque entièrement des importations chinoises pour couvrir ses besoins dans le domaine du photovoltaïque. L'UE ne produit elle-même que 4% des minéraux bruts et 12% des matériaux transformés de la production mondiale d'installations PV et seulement 2% des minéraux bruts et 4% des matériaux transformés de la production mondiale de batteries lithium-ion (chap. 1.2).
- La Suisse est fortement dépendante des importations, principalement des composants ou produits finis : en 2021, 57% des composants pour installations solaires importés par la Suisse provenaient d'Europe (22% d'Allemagne, 18% des Pays-Bas) et 38% de Chine. Toutefois, les composants importés de l'UE dépendent eux-mêmes de matériaux importés de Chine, ce qui fait donc de la Chine un facteur décisif dans la chaîne d'approvisionnement. En 2021, 48% des moteurs et mâts d'éoliennes ont été importés de Turquie, 30% d'Allemagne et 17% d'Italie (chap. 2.1). Comme

la Suisse met l'accent sur le PV et les voitures électriques pour la transition énergétique, les dépendances dans le domaine du PV et des batteries revêtent davantage d'importance que pour l'énergie éolienne, où la demande est plus faible et l'offre plus diversifiée.

- Les risques d'approvisionnement des futurs systèmes d'énergies renouvelables sont différents de ceux des systèmes actuels basés sur les énergies fossiles : une importation continue de combustibles fossiles est nécessaire au fonctionnement des installations à énergie fossile et une pénurie soudaine aurait rapidement des répercussions massives sur l'économie. En revanche, un arrêt d'un an des livraisons de modules PV, par exemple, n'affecterait que le remplacement ou l'extension d'un faible pourcentage des installations. Remplacer les énergies fossiles par des énergies renouvelables entraînerait une forte diminution du risque global lié à l'approvisionnement en combustibles, mais en contrepartie une augmentation du risque d'approvisionnement pour la construction d'installations de production d'électricité (chap. 1.3).

Recommandation

- Réduire la demande en matériaux critiques ; diversifier le mix technologique ; encourager le partage et la réutilisation des produits ; récupérer les matières premières ; éviter l'obsolescence programmée ; éviter les déchets ; encourager la sobriété.

3. Le commerce et la collaboration internationale sont essentiels

- La Suisse joue un rôle central dans le commerce des matières premières et bénéficie donc d'un accès facilité aux plateformes de négoce correspondantes. De plus, la sensibilisation accrue et les inquiétudes face aux défis environnementaux, sociaux, de gouvernance et de santé publique posés par les activités minières peuvent attirer l'attention du public sur le secteur suisse du négoce de matières premières et entraîner une augmentation des risques de réputation pour ce secteur (chap. 2.2).
- Ce qui est crucial pour l'industrie suisse n'est pas l'accès direct aux matériaux critiques, mais le fonctionnement des marchés commerciaux et, à long terme, l'accès aux composants et matériaux de seconde vie (chap. 2.2).

Recommandation

- Coopérer avec l'UE tout au long de la chaîne d'approvisionnement ; mettre en place des chaînes d'approvisionnement sûres et durables pour la Suisse.

4. Être conscient des conséquences sociales de l'exploitation minière

- La forte augmentation de la demande en minéraux et l'expansion de l'exploitation minière qui en résulte entraînent des problèmes sociaux, sanitaires et environnementaux tels que les émissions de gaz à effet de serre, les déchets, la pollution de l'eau et du sol, avec les effets sur la santé que cela implique. Ces derniers doivent être surveillés de près. L'un des principaux problèmes sociaux est l'octroi de licences d'exploitation minière par des États à des entreprises privées et l'atteinte aux droits fonciers locaux qui en découle. Cela entraîne la destruction de moyens de subsistance à long terme et de paysages culturels, des problèmes de santé et l'appauvrissement de communautés locales (chap. 1.4).

Recommandation

→ Soutenir l'introduction et le respect de normes environnementales, sociales et sanitaires dans le secteur minier (et le recyclage).

5. La recherche et le développement technologique sont indispensables

- Les risques d'approvisionnement peuvent être réduits grâce à des innovations technologiques visant à diminuer l'intensité matérielle des composants pour la transition énergétique (substitution, optimisation de la conception, introduction de nouveaux matériaux, accroissement de la longévité des produits) et à la réduction de la consommation d'énergie lors de l'utilisation, p. ex. en produisant des véhicules électriques plus petits et/ou moins lourds et en encourageant l'autopartage (chap. 1.5).
- La Suisse, son industrie et sa recherche disposent d'un potentiel élevé en matière de développement technologique de processus circulaires innovants, de recyclage des minéraux et de réduction de l'intensité matérielle (chap. 2.3).

Recommandation

→ Promouvoir la recherche et l'innovation pour remplacer les minéraux critiques et mettre en place des infrastructures et des chaînes de recyclage.

1 Considérations internationales

1.1 Introduction : inquiétudes quant à l'approvisionnement international en matériaux critiques

De nombreux pays, dont les États-Unis, les pays de l'UE, la Chine et l'Inde, ont annoncé des objectifs ambitieux de zéro émission nette d'ici le milieu du siècle, afin de respecter l'Accord de Paris de 2015. Dans le cadre de la stratégie énergétique et de la loi sur le climat et l'innovation, la Suisse s'est fixée un objectif similaire : zéro émission nette de gaz à effet de serre d'ici 2050. La réalisation de ces objectifs implique une transformation radicale des systèmes énergétiques actuels et le remplacement des combustibles fossiles riches en carbone par des sources d'énergie renouvelables à faibles émissions de CO₂. Dans un scénario mondial à zéro émission nette, les ventes de voitures électriques devraient représenter les deux tiers des ventes de voitures neuves d'ici 2030 et la capacité mondiale de production d'électricité renouvelable devrait tripler entre 2022 et 2030 (AIE 2023b). L'expansion de ces technologies implique également une demande accrue en lignes de transport et de distribution dans les réseaux électriques et en batteries pour stocker l'énergie.

Des inquiétudes croissantes s'expriment quant à la disponibilité de matériaux dits critiques ou d'une importance majeure pour le passage à des énergies propres et qui présentent en même temps un risque d'approvisionnement élevé (Commission européenne 2023b, DOE 2023). L'Union européenne (UE) considère notamment le gallium, le magnésium, les terres rares,¹ le lithium, le germanium, le cobalt, le silicium métal, le nickel et le cuivre comme critiques pour couvrir la demande future dans les domaines des énergies renouvelables et de la mobilité électrique (Commission européenne 2023b). Les technologies d'énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne et solaire nécessitent des quantités considérables de matériaux critiques, p. ex. des terres rares pour les aimants permanents et du silicium métal pour la production de modules photovoltaïques à couches minces. Les batteries de véhicules électriques nécessitent de grandes quantités de lithium, de manganèse et de cobalt, tandis que le cuivre et l'aluminium sont largement utilisés pour construire les lignes du réseau de transport d'électricité.

¹ Les « terres rares » regroupent les 17 éléments chimiques du groupe 3 du tableau périodique. Il s'agit de métaux qui, à une exception près (le prométhium), ne sont pas vraiment rares dans la croûte terrestre ou même (dans le cas du cérium, de l'yttrium et du néodyme) plus fréquents que par exemple le plomb ou le cuivre. En revanche, les gisements importants et économiquement exploitables sont rares.

Chaîne d'approvisionnement en matériaux

(Commission européenne 2023b)

L'approvisionnement en matériaux critiques comprend différentes étapes :

- **Matières premières** : minéraux bruts extraits, traités et affinés. Les opérations de traitement consistent à séparer, à fondre, à affiner et à purifier les substances minérales extraites.
- **Matériaux transformés** : produits semi-finis (p. ex. alliages métalliques) constitués d'une combinaison de plusieurs matériaux (p. ex. alliages)
- **Composants** : sous-éléments d'une technologie (p. ex. aimants permanents)
- **(Super) modules** : composants assemblés (p. ex. moteurs électriques)

Les risques d'approvisionnement ne sont en général pas dus à une pénurie physique mondiale (les réserves minérales sont un concept dynamique qui dépend de l'exploration, des technologies et de la viabilité économique [Meinert et al. 2016]) mais plutôt à des aspects et risques géopolitiques tout au long de la chaîne d'approvisionnement (voir encadré). Il est donc difficile d'augmenter l'offre à la vitesse et avec l'ampleur requises pour répondre à la demande.

1.2 Concentration de l'exploitation minière et de la transformation dans quelques pays

Un problème géopolitique majeur est que l'extraction des matières premières et la transformation de ces matériaux ont tendance à être concentrées dans un petit nombre de pays, la Chine occupant une position dominante sur de nombreux marchés (Leruth et al. 2022, Cool et al. 2020), voir figure 1. La domination de la Chine est particulièrement importante sur le marché des terres rares, où elle contrôle la majeure partie de la chaîne d'approvisionnement. La Chine produit environ 60% de l'offre mondiale de terres rares et est propriétaire de quasiment toutes les installations de raffinage (USGS 2019). Le rôle clé de la Chine dans le domaine des matériaux critiques est le fruit des efforts stratégiques des dernières décennies pour conquérir l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement par le biais de politiques industrielles et d'investissements dans des projets miniers à l'étranger. En outre, les États-Unis ont cessé la plupart de leurs acti-

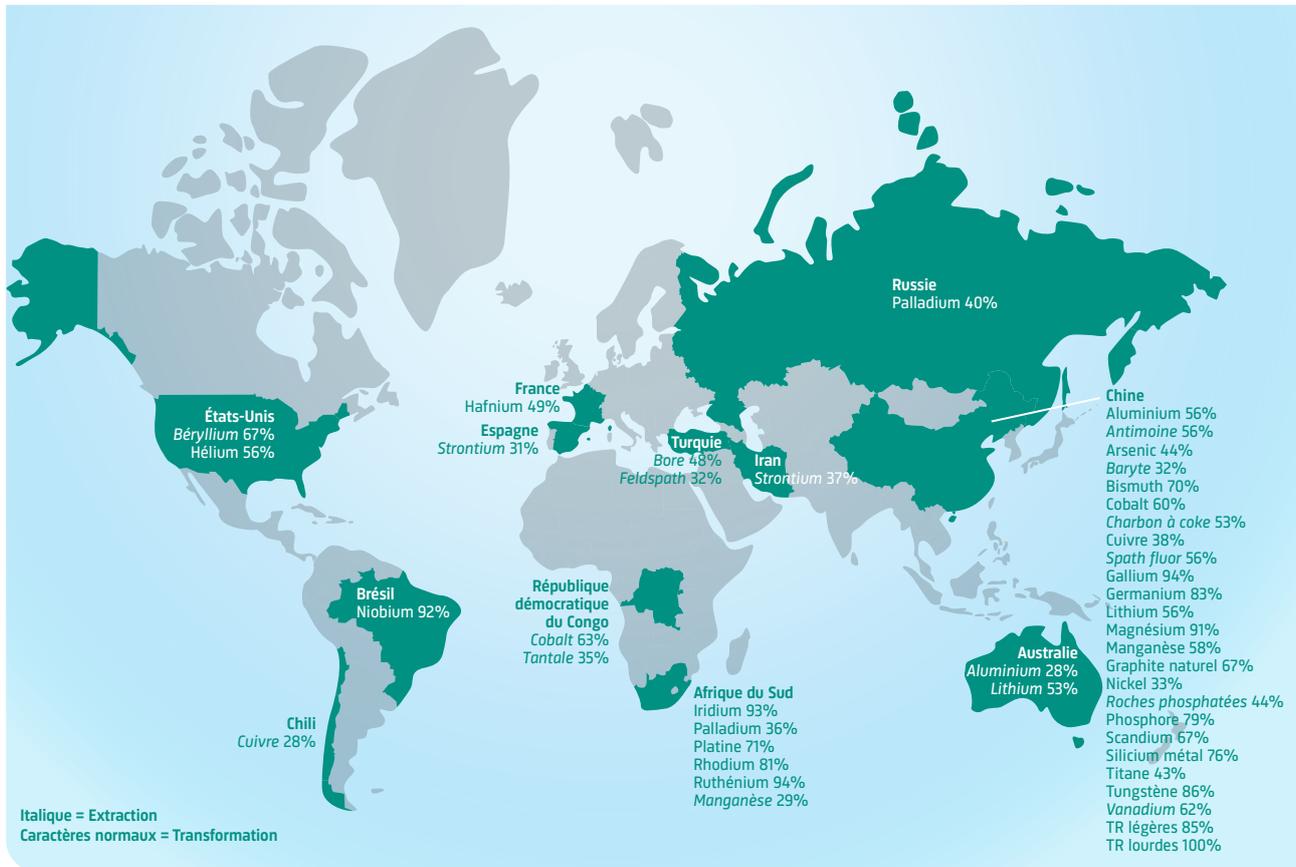


Figure 1: Pays représentant la plus grande part de l'approvisionnement mondial en matériaux critiques. Source : Commission européenne 2023a

vités minières dans le domaine des terres rares il y a déjà plusieurs décennies, bien qu'ils disposent de réserves considérables. Alors que l'Australie et le Chili produisent 70% du lithium mondial, les entreprises d'État chinoises contrôlent un tiers du marché global (en raison de leurs capacités monopolistiques de raffinage du spodumène et de conversion du carbonate de lithium en hydroxyde de lithium). La République démocratique du Congo produit près de 70% du cobalt mondial, mais la plupart des entreprises exploitant des mines de cobalt, hormis Glencore, sont basées en Chine, car ce pays a cherché activement à obtenir des droits d'exploitation minière exclusifs dans plusieurs pays africains dans le cadre de l'initiative des « nouvelles routes de la soie » (Leruth et al. 2022). La Russie est également un acteur clé dans l'approvisionnement en matériaux critiques, car elle contribue à hauteur d'environ 10% à l'offre mondiale de nickel, dont 20% à l'offre mondiale de nickel de classe I, nécessaire à la production de batteries. La récente invasion russe en Ukraine a suscité des inquiétudes quant au risque d'interruption des approvisionnements en raison de sanctions commerciales et économiques.

Les pays ayant une forte demande et des volumes considérables d'importations de matériaux essentiels pour leur transition énergétique dépendent donc largement d'un petit groupe de fournisseurs. L'UE dépend par exemple entièrement des importations chinoises pour couvrir ses besoins dans le domaine du photovoltaïque. La figure 2 montre les différentes étapes de la chaîne d'approvisionnement du photovoltaïque : l'UE produit seulement 4% de la production mondiale des minéraux bruts et 12% des matériaux transformés. La situation est plus grave encore pour les batteries lithium-ion : l'UE produit seulement 2% de la production mondiale des minéraux bruts et 4% des matériaux transformés.

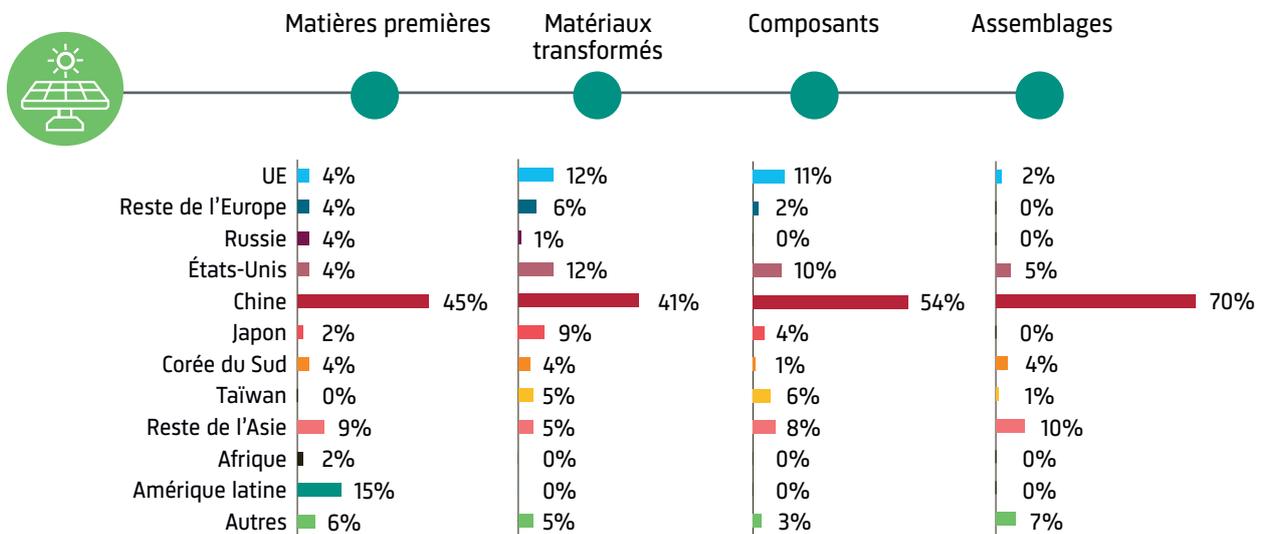


Figure 2: Concentration de l'offre et principaux acteurs tout au long de la chaîne d'approvisionnement du photovoltaïque dans l'UE. Les pourcentages indiquent la part moyenne des différents pays dans la production mondiale à chaque étape de la chaîne d'approvisionnement.

Source : Commission européenne 2023b

Les hausses de prix et la volatilité dues aux restrictions d'approvisionnement peuvent réduire à néant les réductions de coûts obtenues au cours de la dernière décennie dans le domaine des technologies propres, compromettant ainsi l'accessibilité financière de la transition énergétique. Alors que les matériaux cathodiques (cobalt, nickel et manganèse) représentaient moins de 5% du coût des packs de batteries en 2015, ils correspondent aujourd'hui à 20% du coût. Certains indicateurs montrent que les prix des PV solaires et des batteries lithium-ion ont de nouveau augmenté entre 2020 et 2021 (AIE 2023a) et entre 2021 et 2022 (Goldmann Sachs 2023), après avoir baissé pendant une décennie. Il conviendra d'examiner s'il s'agit de tendances à long terme ou seulement de fluctuations à court terme dues à la pénurie actuelle de matériaux ou à des interruptions de la chaîne d'approvisionnement encore imputables à la pandémie de COVID. Par ailleurs, dans de nombreux cas, les moteurs économiques de l'extraction de minéraux critiques ne sont pas ces minéraux eux-mêmes, mais l'extraction d'autres matières premières, les minéraux ne constituant que des sous-produits. L'offre et les prix ne suivent donc pas nécessairement la demande.

1.3 Risques d'approvisionnement différents

Les risques d'approvisionnement des futurs systèmes d'énergies renouvelables sont différents de ceux des systèmes actuels basés sur les énergies fossiles: les installations fonctionnant aux énergies fossiles requièrent un réapprovisionnement continu en combustible, alors que

les matériaux critiques ne sont nécessaires que pour la construction d'installations, lesquelles peuvent fonctionner sans fourniture d'autres matériaux, excepté peut-être en cas de dommage. Une pénurie soudaine de combustibles fossiles aurait rapidement des répercussions massives sur l'économie, possiblement atténuée grâce aux réserves obligatoires de produits pétroliers. Par contre, un arrêt d'un an des livraisons de modules PV concernerait « seulement » le remplacement ou la construction d'un faible pourcentage des installations, dont la durée de vie est d'environ 25 ans, et ne mettrait pas en péril la production d'électricité avec le parc existant. Les voitures électriques sont importées entièrement assemblées et ne seraient affectées qu'en cas d'un éventuel « black-out », tandis que les véhicules essence et diesel seraient directement affectés par un arrêt des importations de combustibles fossiles.

Les installations de systèmes d'énergies renouvelables sont généralement plus gourmands en minéraux, car l'électricité propre nécessite davantage de minéraux par kilowatt que l'électricité issue de combustibles fossiles. La fabrication d'une seule voiture électrique nécessite par exemple plus de 200 kg de minéraux – principalement cuivre, nickel, lithium, manganèse et graphite – contre 35 kg pour une voiture conventionnelle (surtout du cuivre et du manganèse) (AIE 2022a). Quant aux risques géopolitiques, les marchés des matières premières minérales sont souvent petits et le degré de concentration plus élevé que pour les marchés des combustibles fossiles. Par rapport aux sites d'extraction de pétrole et de gaz, l'ex-

l'exploitation minière a tendance à se concentrer davantage dans les pays en développement, où le risque politique est élevé, car les gisements y sont importants et l'opposition sociale à l'ouverture de mines y est moindre ou sans conséquences politiques. Toutefois, l'ampleur des activités minières nécessaires à la transition énergétique pourrait être moins importante que pour les combustibles fossiles, étant donné notamment que les minéraux peuvent être recyclés (Nijmens et al. 2023).

Pour atténuer ces risques et les futures ruptures d'approvisionnement, plusieurs pays ont déjà initié des mesures de diversification de leurs chaînes d'approvisionnement. En novembre 2023, l'UE est parvenue à un accord concernant la loi européenne sur les matières premières critiques. Cette loi qui entre en vigueur en 2024 vise à sécuriser l'approvisionnement en matières premières stratégiques (y compris l'aluminium et le graphite synthétique) : la « capacité nationale » d'extraction de matières premières stratégiques dans l'UE doit être portée à au moins 10% de la consommation annuelle, la capacité de transformation à 40% et la capacité de recyclage à au moins 25% de la consommation annuelle de l'UE. De plus, les importations doivent être diversifiées pour que d'ici 2030 aucun pays ne couvre plus que 65% de la consommation annuelle de l'UE (Commission européenne, 2023d). Aux États-Unis, l'*Inflation Reduction Act* prévoit des déductions fiscales pour les fabricants de voitures électriques et de batteries s'ils utilisent une part importante de matériaux critiques provenant des États-Unis ou d'un pays ayant conclu un accord commercial avec les États-Unis. La Corée du Sud a également défini des minéraux stratégiques pour des secteurs importants à l'échelle nationale, tels que les moteurs, batteries et semi-conducteurs.

1.4 Effets néfastes de l'exploitation minière sur l'environnement local

De nouvelles activités de prospection et d'exploitation minière dans les pays industrialisés ou leurs partenaires commerciaux pourraient contribuer à augmenter et à diversifier l'offre de minéraux essentiels. La prospection et l'extraction sont toutefois limitées par la nécessité de prendre en compte les impacts environnementaux et sociaux de l'exploitation minière. Les effets néfastes de celle-ci sur l'environnement local sont bien établies. L'extraction de minéraux est associée à différents problèmes environnementaux, tels que la pollution de l'air, la contamination locale par des produits chimiques toxiques, la dégradation du paysage, la perte de biodiversité et la production de déchets (Sengupta 2021). Les minéraux destinés à la production d'énergies renouvelables ou de batteries ne représentent certes qu'une part infime de

l'ensemble des activités minières, production d'énergies fossiles comprise, et la transition vers des énergies renouvelables réduira potentiellement le volume des activités minières (Krane et Idel 2021, Nijmens et al. 2016), mais la forte augmentation de la demande risque pour l'instant d'entraîner une expansion de l'exploitation minière. Les questions sociales, sanitaires et environnementales qui y sont liées devraient donc être examinées de près.

L'extraction, le concassage et le transport en camion du minerai requièrent de grandes surfaces, beaucoup d'énergie et génèrent de fortes émissions, et les déchets et résidus miniers peuvent contaminer l'eau et le sol, avec des effets négatifs sur la santé des populations concernées. L'exploitation minière est également associée à un grand nombre d'impacts sociaux et politiques négatifs qui affectent gravement les moyens de subsistance des communautés vivant à proximité des mines, sans compter le déplacement de populations locales, la violation de droits humains et la contribution aux conflits armés. L'un des problèmes majeurs est l'héritage colonial et post-colonial des industries extractives, qui a porté gravement atteinte aux droits fonciers (souvent des biens communs), en octroyant des licences d'exploitation minière à des entreprises privées. Cette forme d'appropriation des biens communs entraîne souvent non seulement une pollution de l'environnement, mais aussi la destruction de moyens de subsistance locaux à long terme et de paysages culturels riches en biodiversité, des problèmes de santé et l'appauvrissement de communautés locales (Niederberger et al. 2016, Haller 2019, Haller et al. (éd.) 2020, Sternberg et al. 2022). Les mesures de responsabilité sociale d'entreprise (« Corporate Social Responsibility » CSR) ne suffisent pas à couvrir les pertes à long terme et ne sont généralement pas mises en œuvre de manière participative (Niederberger et al. 2016, Dolan et Rajak 2022).

L'expansion de l'exploitation minière pour la production d'énergie verte risque donc d'aggraver ce processus d'acapement des terres au nom d'une transition vers des énergies durables et vertes et d'objectifs de développement durable (Larsen et al. 2022). Pour concilier l'extraction de minéraux avec les objectifs de la transition énergétique, il convient donc de transformer en profondeur les processus de production en développant des technologies minières propres, en améliorant la traçabilité des activités minières et extractives, et en impliquant les communautés locales dans les processus de décision. Dans de nombreux pays producteurs, les données permettant d'évaluer l'impact sur l'environnement, la société et la gouvernance sont encore limitées, non standardisées ou même inexistantes. L'introduction d'un passeport produit numérique pourrait être une option pour résoudre ce problème. Le règlement relatif aux batteries, en vigueur depuis 2023 (Commission européenne 2023c), constitue

un pas dans cette direction. Le « Critical Minerals Policy Tracker » de l'AIE (2022b) tente de fournir des informations sur les développements politiques et les questions ESG (environnementales, sociales et de gouvernance) et de collaborer avec les gouvernements et autres parties prenantes, afin de définir de nouvelles orientations politiques pour réduire les effets négatifs de la production de minéraux (AIE 2023c).

1.5 Réduction des risques d'approvisionnement

L'innovation technologique peut également contribuer dans une large mesure à réduire les risques d'approvisionnement en diminuant l'intensité matérielle des composants. La substitution technologique, l'amélioration de l'efficacité, l'optimisation de la conception, l'introduction de nouveaux matériaux ou l'accroissement de la longévité des produits peuvent influencer la demande en minéraux et matériaux critiques. Par exemple, depuis 2015, les changements dans la chimie des batteries de véhicules électriques, qui donnent une part accrue au lithium-fer-phosphate (LFP), ont considérablement réduit la dépendance au cobalt et au nickel (EERA 2023). Le recyclage des produits en fin de vie peut aussi améliorer la disponibilité future de matériaux critiques, même si la rentabilité du recyclage par rapport à l'extraction de nouveaux matériaux est encore discutable. L'introduction d'informations obligatoires sur l'empreinte écologique des matériaux pourrait être une option pour accroître la compétitivité du recyclage. Dans un monde où la demande augmente rapidement et compte tenu de la durée de vie de 10 à 20 ans des voitures et de 20 à 30 ans des installations éoliennes et PV, le recyclage ne peut contribuer que de manière marginale à l'approvisionnement à court et moyen terme (Liang et al. 2023), mais il est essentiel de créer dès aujourd'hui des systèmes efficaces pour le long terme.

Enfin, les risques d'approvisionnement peuvent être réduits en diminuant la demande en matériaux destinés aux technologies énergétiques telles que les voitures électriques, par exemple en produisant des véhicules électriques plus petits et/ou moins lourds et en encourageant l'autopartage.

2 Défis et opportunités pour la Suisse

2.1 Défis pour la Suisse

La Suisse est certes un pays riche en matières premières, mais celles-ci sont destinées principalement au secteur de la construction (gravier, sable, etc.). Pour les minéraux ou métaux critiques, tels que le cobalt, le lithium ou les terres rares, la Suisse dépend surtout des importations, souvent sous forme de produits pré-transformés et semi-finis. La Suisse joue toutefois un rôle central dans le commerce des matières premières (voir chap. 2.2) et bénéficie donc d'un accès facilité aux plateformes de négoce international pour ces matières. La Suisse occupe une place importante au niveau mondial dans la transformation d'or brut et le commerce d'or fin et de produits en or, mais ce n'est pas le cas pour d'autres minéraux critiques. Elle doit soit importer des matériaux raffinés pour ses entreprises qui développent des technologies et fabriquent des produits finis (p.ex. Gurit, Meyer Burger, ABB), soit importer directement des produits finis. Pour l'industrie suisse, ce n'est pas l'accès direct aux matières premières critiques qui est déterminant, mais plutôt le bon fonctionnement des marchés commerciaux.

Origine des importations suisses

La Suisse n'importe qu'une petite quantité de terres rares brutes, mais la majorité d'entre elles (57%) proviennent aujourd'hui d'Asie. En 2021, 26% des terres rares importées en Suisse provenaient de Chine, 26% d'Inde et 10% d'Indonésie. L'Europe représente 34% des importations suisses (principalement d'Allemagne, de France et d'Autriche). La part de l'Asie a triplé au cours des dix dernières années; en 2010, l'Europe représentait encore 73% des importations suisses et l'Asie seulement 19%.²

Un sondage effectué en 2016 auprès d'entreprises suisses du secteur des machines, des équipements électriques et des métaux a révélé que 20% d'entre elles utilisaient des terres rares, en plus du chrome (74%), du molybdène (69%), du magnésium (60%), du tungstène (57%) et du graphite (53%). Et ce, principalement, via la livraison indirecte de produits intermédiaires, car ces entreprises

suisse se trouvent à la fin de la chaîne d'approvisionnement (Conseil fédéral 2018).

Les terres rares sont essentielles dans la fabrication des aimants permanents qui sont utilisés dans les robots industriels, les montres, mais aussi les éoliennes. Les données du commerce international montrent que l'Asie représente 87% des importations suisses d'aimants permanents (36% pour la Chine et 47% pour la Malaisie), contre 68% en 2010. Au cours des dix dernières années, la part de l'Europe dans les importations suisses d'aimants permanents est passée de 31% à 11%.

L'accélération de la transition vers les énergies renouvelables peut engendrer de nouveaux défis. Alors qu'au début du développement de l'énergie solaire, les entreprises suisses faisaient partie des leaders mondiaux, la Suisse a perdu cette position et doit, comme les autres pays européens, importer la plupart des produits finis, même s'il existe encore un certain nombre de petites entreprises qui fabriquent elles-mêmes des panneaux solaires. La part de l'énergie solaire dans la consommation énergétique suisse augmente très rapidement (de 3% en 2019 à 6,6% en 2022 et 10% en 2023; OFEN 2023) et la croissance du marché a été multipliée par six depuis 2017 (Swissolar 2024). La demande continuera donc d'augmenter et les importations contribueront dans une large mesure à la future capacité solaire installée en Suisse.

En 2021, 38% des composants et machines pour installations solaires ont été importés de Chine, 22% d'Allemagne et 18% des Pays-Bas, alors qu'en 2010, ces parts étaient respectivement de 15%, 46% et 7%. Actuellement, l'Europe reste la principale source de composants solaires pour la Suisse (57%), devant l'Asie (42%), voir figure 3. Toutefois, les composants importés de l'UE dépendent eux-mêmes de matériaux importés de Chine, de sorte que la dépendance vis-à-vis de la Chine dans la chaîne d'approvisionnement reste importante. La loi européenne sur les minéraux critiques visant à garantir l'approvisionnement en matériaux critiques et stratégiques (voir chap. 1.3), qui entrera en vigueur en 2024, pourrait permettre à l'avenir de réduire cette dépendance indirecte.

En ce qui concerne les moteurs et tours d'éoliennes, la Suisse importe en 2021 la majorité de ces composants (51%) d'Asie (48% de Turquie, 1% de Chine, 0,4% du Japon et du Vietnam), le reste provenant d'Europe (49% – principalement d'Allemagne avec 30% et d'Italie avec 17%) (voir fig. 3). Pour la transition énergétique, comme la Suisse met l'accent sur les installations PV et les voi-

² Les statistiques commerciales présentées dans cette section proviennent de la base de données BACI sur les flux commerciaux bilatéraux (Gaulier et Zignago 2010). Les produits sont identifiés grâce aux codes HS du Système Harmonisé (révision SH de 2007). Les pourcentages sont calculés sur la base des parts des pays d'origine dans le total des importations suisses par produit (pays déclarant: Suisse). Les codes SH utilisés pour 1) les terres rares et les aimants permanents proviennent de Mancheri (2015, 2016), 2) l'énergie éolienne de Subramaniam (2019) et 3) l'énergie solaire de l'OMC (2022). Nous remercions Ayse Nihal Yilmaz pour l'excellente assistance pour la collecte et le traitement de ces données.

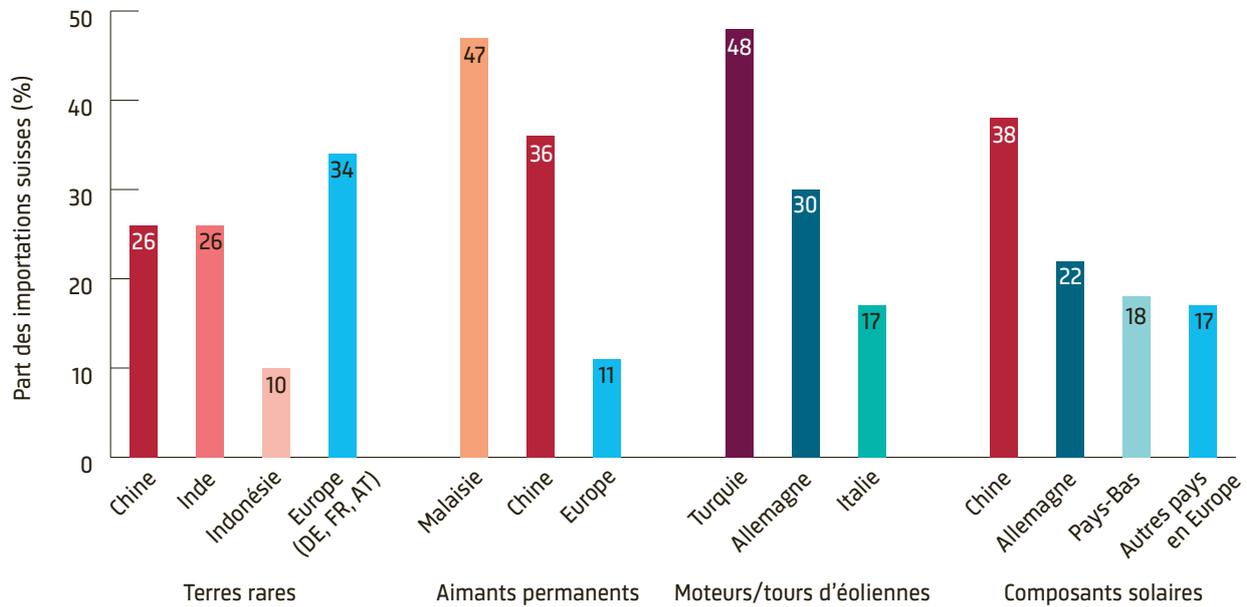


Figure 3: Pays d'où proviennent une part importante des importations suisses en 2021: terres rares, aimants permanents et moteurs et tours d'éoliennes (tous des composants d'éoliennes) et composants photovoltaïques. Source: base de données BACI sur les flux commerciaux bilatéraux.²

tures électriques, les dépendances dans le domaine du PV et des batteries revêtent davantage d'importance que pour l'énergie éolienne, où la demande est plus faible et l'offre plus diversifiée.

Pénuries, prix et politique

L'augmentation rapide de la demande en minéraux et matériaux critiques pourrait entraîner à l'échelle mondiale des pénuries de matériaux, de produits semi-finis et finis, et une hausse des coûts qui n'a pas été suffisamment anticipée. Cela pourrait se répercuter sur les coûts des entreprises suisses qui développent des technologies et qui fabriquent des produits finis dans le domaine de l'énergie, ainsi que sur la transition énergétique en général, et ralentir celle-ci, et donc la décarbonisation du secteur de l'énergie. Au vu de l'expérience acquise avec la pandémie de COVID et l'augmentation récente des conflits et des incertitudes politiques, la sécurité de l'approvisionnement revêt une importance particulièrement accrue et fait l'objet d'efforts croissants visant à augmenter la fabrication de produits finis dans le pays même ou au moins au sein de l'Europe. Ceci, conjugué aux efforts croissants de réduction des impacts environnementaux et sociaux de l'exploitation minière, pourrait encore accroître les coûts de la transition énergétique. D'un autre côté, l'augmentation de la demande et la volonté de réduire les coûts ne sont guère compatibles avec la demande d'amélioration des normes environnementales et sociales dans le secteur minier.

Sur le plan politique, le fait qu'il n'existe traditionnellement en Suisse que peu de mesures de politique industrielle pour sécuriser l'approvisionnement pourrait constituer un défi supplémentaire. Une stratégie actuellement observée à l'échelle mondiale consiste à négocier des accords bilatéraux, voire à mettre en place de vastes réseaux de pays riches en matières premières par le biais d'une diplomatie économique, afin d'absorber les chocs internationaux et de gérer les risques de pénurie. En matière de politique étrangère, cela pourrait inciter les États à davantage « prendre parti » et à remettre partiellement en cause leurs politiques de neutralité.

2.2 Rôle du secteur suisse du négoce de matières premières

Le secteur du négoce de matières premières représente 8% du PIB suisse et constitue donc un secteur d'activité économique essentiel en Suisse. En 2020, quelque 900 entreprises étaient actives dans ce secteur, faisant de la Suisse la plus grande plateforme du négoce de matières premières. Environ 60% du commerce international de métaux de base tels que le zinc, le cuivre et l'aluminium (Swiss Academy of Sciences 2016) sont négociés en Suisse. Un certain nombre d'entreprises suisses (p. ex. Glencore, Mercuria, Trafigura) extraient, transforment, expédient et vendent des métaux. Glencore représente 19% de la production mondiale de cobalt, 6% pour le cuivre et 4% pour le nickel (Leruth et al. 2022).

En raison de la place importante de la Suisse dans le secteur du négoce, les inquiétudes face aux défis environnementaux, sociaux et de santé publique posés par les activités minières vont attirer l'attention du public sur le rôle du secteur suisse du négoce de matières premières (WRF/MRF 2023), entraînant une augmentation des risques de réputation pour ce secteur. La Suisse s'engage en faveur de l'amélioration des activités ESG au niveau multilatéral et continue de plaider pour une meilleure souveraineté environnementale dans le domaine des matières premières. En 2022, la Suisse a joué un rôle déterminant dans l'adoption de la résolution de l'ONU sur les aspects environnementaux des matières premières. Celle-ci appelle les États membres et les parties prenantes à aligner leurs pratiques et leurs investissements dans le secteur minier sur l'Agenda 2030. Au niveau national, une obligation de transparence pour les grandes entreprises et les établissements financiers sur les questions environnementales, les conditions de travail et le respect des droits humains, ainsi que des devoirs de diligence et de divulgation dans le domaine des « minéraux de conflit » et de la lutte contre le travail des enfants ont récemment été introduits (Conseil fédéral 2023). En revanche, des réglementations plus strictes (Initiative pour des multinationales responsables) ont été rejetées par le peuple suisse lors d'un vote très serré en novembre 2020, ou plus précisément ont été acceptées de manière générale par le corps électoral, mais refusées par la majorité des cantons. Cependant, à partir de 2024, les entreprises publiques, les banques et les assurances employant au moins 500 personnes et présentant un total du bilan d'au moins 20 millions de CHF ou un chiffre d'affaires de plus de 40 millions de CHF sont tenues en Suisse de divulguer les risques liés au changement climatique. Des discussions similaires sont en cours au sein de l'UE (p. ex. Commission européenne 2022) et aux États-Unis. Une telle politique de divulgation permet d'inciter le secteur financier à investir dans des procédés et des technologies propres, qui contribuent à mettre en place des chaînes d'approvisionnement sûres et durables.

2.3 Opportunités pour l'économie circulaire et l'innovation technologique

Les pénuries de ressources peuvent aussi stimuler l'innovation, comme le montre l'exemple du Japon qui, après la crise des terres rares, a fait d'énormes progrès en matière de substitution et de recyclage des terres rares. Bien que la Suisse soit un petit pays, son industrie et sa recherche disposent d'un potentiel élevé en matière de développement technologique de processus circulaires innovants, de recyclage des matériaux critiques provenant des batteries ou des panneaux solaires, et pourraient construire des installations adéquates. La Suisse dispose déjà d'un bon bilan en matière de recyclage des déchets électroniques, encouragé par des réglementations appropriées en matière de récupération et de valorisation. Ces activités pourraient être encore renforcées en mettant davantage l'accent sur les matières premières stratégiques, notamment les matériaux critiques pour lesquels il n'existe pas d'installations de traitement et de transformation en Suisse (CSS 2023). Ceci impliquerait par exemple de développer à grande échelle des usines et installations de recyclage qui encouragent l'application des meilleures normes d'extraction, en suivant par exemple les normes techniques telles que les normes ISO (ISO/DIS 2023).

D'autres objectifs majeurs d'innovation sont la réduction de l'intensité minérale des nouvelles technologies de l'énergie et la diversification du mix technologique qui utilise les matériaux critiques. En parallèle, l'innovation peut permettre de développer de nouvelles technologies qui réduisent l'empreinte écologique des activités extractives, par exemple en économisant l'eau et l'énergie. La création de bases de données ou d'étiquetages relatifs à la toxicité et autres impacts environnementaux pourrait contribuer à promouvoir de tels efforts.

Toutes ces activités peuvent permettre de réduire la dépendance à l'égard des importations. Un autre aspect très important est la prévention et le recyclage des déchets. C'est le moyen le plus efficace pour limiter les besoins en énergie et l'impact environnemental de l'extraction, de l'utilisation et du recyclage des matériaux. La réduction de la demande et l'encouragement de la sobriété en font également partie.

3 Recommandations

3.1 Options politiques et recommandations finales

Premièrement, nous devons reconnaître que l'approvisionnement en minéraux critiques et la transition énergétique de manière générale sont des défis mondiaux. Cela signifie que même si la Suisse, l'UE ou les États-Unis parviennent à garantir leur approvisionnement, par exemple par le biais d'accords bilatéraux ou multilatéraux, la décarbonisation du système énergétique à l'échelle globale ne fonctionnera pas en cas de pénurie mondiale de minéraux critiques. Parallèlement aux stratégies et aux efforts visant à garantir l'approvisionnement national, il sera donc essentiel de développer de nouvelles technologies permettant d'améliorer l'efficacité de la production, de promouvoir le recyclage et d'accroître la diversité et la substituabilité des matériaux.

Deuxièmement, les efforts en termes de recyclage et d'efficacité ne seront sans doute pas suffisant pour compenser l'augmentation rapide de la demande en installations d'énergies renouvelables, voitures électriques, batteries et autres technologies énergétiques propres (Liang et al. 2023). Cela signifie qu'une expansion mondiale de l'extraction et de la production de certains matériaux est très probable, en particulier à court et moyen terme, tandis que l'extraction de ressources fossiles devrait diminuer. À plus long terme, des innovations dans le domaine des technologies alternatives et de remplacement pourraient réduire la demande.

Troisièmement, l'augmentation rapide de la demande, associée à la baisse de la teneur en minerai des gisements de cobalt, lithium et graphite, entraînera une augmentation de la consommation d'énergie pour l'extraction et le traitement et, couplée à de probables pénuries d'approvisionnement, une hausse considérable des prix. Au vu de la pression croissante exercée sur les chaînes d'approvisionnement, les aspects environnementaux et sociaux de l'exploitation minière risquent fort d'être relégués au second plan, même si l'exploitation minière se développe dans l'UE et d'autres pays dotés de normes et de contrôles très stricts. Néanmoins, il est essentiel de prendre en compte ces aspects lors de l'élaboration de stratégies visant à garantir l'approvisionnement.

Pour relever les défis qui nous attendent dans les chaînes d'approvisionnement en minéraux critiques, nous recommandons de mettre l'accent sur les champs d'action suivants :

- Réduction de la demande :
 - promouvoir la recherche et l'innovation pour remplacer les matériaux critiques nécessaires aux technologies pour la transition énergétique (p. ex., batteries, panneaux photovoltaïques, éoliennes, électrolyseurs, catalyseurs, etc.) par des éléments disponibles en abondance ou réduire les quantités nécessaires tout en maintenant, voire en améliorant, les performances ;
 - diversifier le mix technologique à l'échelle nationale pour ne pas trop dépendre de certains matériaux ;
 - mettre en place des infrastructures et des chaînes de recyclage ;
 - élaborer une stratégie pour accroître la longévité : éviter l'obsolescence programmée, encourager l'allongement de la durée d'utilisation des produits et la compatibilité de différents composants ;
 - promouvoir l'innovation sociale, par exemple le partage et la réutilisation des produits ;
 - améliorer la prévention et le recyclage des déchets ;
 - prendre en compte l'effet rebond.
- Coopération avec l'UE et/ou au niveau international en matière d'innovation tout au long de la chaîne d'approvisionnement.
- Élaboration d'une quantification plus précise des minéraux, matériaux et produits critiques dont la Suisse a besoin pour la transition énergétique, ainsi que de leur origine et des coûts sociaux et environnementaux qu'ils impliquent. Identification des matières premières « sensibles » dont l'impact environnemental, social et économique négatif est particulièrement élevé.
- Mise en place de chaînes d'approvisionnement sûres et durables pour la Suisse, en tenant compte des stratégies européennes et des coopérations internationales, et du fait que la Suisse importe principalement des produits technologiques finis plutôt que les matières premières elles-mêmes. Cela signifie par exemple :
 - conclure des contrats d'approvisionnement avec des fournisseurs et des pays fiables ;
 - privilégier l'exploitation minière, la transformation et la production au sein de l'Europe pour renforcer la sécurité de l'approvisionnement ;
 - évaluer la nécessité et les opportunités de soutenir l'industrie suisse, y compris l'option d'importantes subventions de l'État comme en Chine et aux États-Unis.

- Soutien en matière de fixation et de respect de normes environnementales, sociales et sanitaires dans le secteur minier:
 - veiller à ce que les entreprises minières et technologiques suivent les progrès réalisés et introduisent éventuellement des mesures d'étiquetage ou de certification ; cela implique également une communication transparente sur les conditions socio-économiques et environnementales tout au long de la chaîne d'approvisionnement, par exemple via des passeports numériques pour les produits ou le respect des exigences de transparence de l'UE sur les aspects sociaux, sanitaires et environnementaux ;
 - promouvoir les bonnes pratiques et des normes strictes en matière de développement minier à travers le secteur du négoce des matières premières ;
 - inciter les négociants en matière première à développer des produits financiers tenant compte de spécifications ESG et à utiliser leurs capitaux pour financer des activités minières pour l'extraction (propre) de matériaux critiques.

Références

- Commission européenne (2022) **Proposition de DIRECTIVE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL sur le devoir de vigilance des entreprises en matière de durabilité**. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0071>
- Commission européenne (2023a) **Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report**. https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/study-critical-raw-materials-eu-2023-final-report_en
- Commission européenne (2023b) **Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study** (Carrara S. et al.). doi:10.2760/386650 <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC132889>
- Commission européenne (2023c) **Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries**. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/batteries_en
- Commission européenne (2023d) **European Critical Raw Materials Act**. https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/european-critical-raw-materials-act_en
- Conseil fédéral (2018) **L'approvisionnement de la Suisse en terres rares**. <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/55234.pdf>
- Conseil fédéral (2023) **État de la mise en œuvre des recommandations formulées dans le rapport « Secteur suisse des matières premières: état des lieux et perspectives »**. Berne, Suisse. (lien, communiqué de presse).
- CSS (2023) **Mind the E-Waste: A Case for Switzerland**. Perspectives politiques 11/3. Centre d'études sur la politique de sécurité (CSS) EPF Zurich. https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/gess/cis/center-for-securities-studies/pdfs/PP11-3_2023-EN.pdf
- DOE (2023) **Critical Material Assessment**. US Department of Energy. https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/doe-critical-material-assessment_07312023.pdf
- Dolan C, Rajak D (Eds.) (2022) **The anthropology of corporate social responsibility**. Berghahn Books.
- EERA (2023) **Securing sustainable critical raw material supply for clean energy in Europe**. European Energy Research Alliance (EERA). ISBN: 978-2-931174-03-6.
- Gaulier G, Zignago S (2010) **BACI: International Trade Database at the Product-Level**. The 1994-2007 Version. CEPII Working Paper N°2010-23. <http://www.cepii.fr/CEPII/fr/publications/wp/abstract.asp?NoDoc=2726>
- Goldmann Sachs (2023) **Electric vehicle battery prices are falling faster than expected**. <https://www.goldmansachs.com/intelligence/pages/electric-vehicle-battery-prices-falling.html> (publié le 1er nov. 2023)
- Haller T, Ngutu M, Käser F (2020) **Does Commons Grabbing Lead to Resilience Grabbing? The Anti-Politics Machine of Neo-Liberal Development and Local Responses**. Land, special edition. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03943-840-2>. https://www.mdpi.com/journal/land/special_issues/landgrabbing
- Haller T (2019) **The Different Meanings of Land in the Age of Neoliberalism: Theoretical Reflections on Commons and Resilience Grabbing from a Social Anthropological Perspective**. Land, 8(7): 104. <https://doi.org/10.3390/land8070104>
- IEA (2022a) **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. World Energy Outlook Special Report (p. 287). International Energy Agency.
- IEA (2022b) **Critical Minerals Policy Tracker**. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/introducing-the-critical-minerals-policy-tracker>
- IEA (2023a) **Critical Minerals Market Review 2023**. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023>
- IEA (2023b) **Net Zero Roadmap: A global pathway to keep the 1.5C goal in reach**. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>
- IEA (2023c) **Sustainable and Responsible Critical Mineral Supply Chains**. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/sustainable-and-responsible-critical-mineral-supply-chains>
- ISO/DIS (2023) **Environmental management and circular economy: sustainability and traceability of secondary materials recovery – principles and requirements**. ISO/DIS 59014 (in development). International Organization for Standardization, 2023: <https://www.iso.org/standard/80694.html>
- Krane J, Idel R (2021) **More transitions, less risk: How renewable energy reduces risks from mining, trade and political dependence**. Energy Research & Social Science, 82, 102311. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102311>
- Larsen PB, Haller T, Kothari A (2022) **Sanctioning Disciplined Grabs (SDGs): From SDGs as Green Anti-Politics Machine to Radical Alternatives**. Geoforum 131: 20-26.
- Lee J, Bazilian M, Sovacool B, Hund K, Jowitt SM, Nguyen TP, Månberger A, Kah M, Greene S, Galeazzi C, Awuah-Offei K, Moats M, Tilton J, Kukoda S (2020) **Reviewing the material and metal security of low-carbon energy transitions**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 124: 109789. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109789>
- Leruth L, Mazarei A, Régibeau P, Renneboog L (2022) **Green Energy Depends on Critical Minerals. Who Controls the Supply Chains?** (document de travail 22-12:), Peterson Institute for International Economics.
- Liang Y, Kleijn R, Van Der Voet E (2023) **Increase in demand for critical materials under IEA Net-Zero emission by 2050 scenario**. Applied Energy 346: 121400.
- Mancheri NA (2015) **World trade in rare earths, Chinese export restrictions, and implications**. Resources Policy 46(2): 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.10.009>
- Mancheri NA (2016) **An Overview of Chinese Rare Earth Export Restrictions and Implications**. In: Borges De Lima I, Leal Filho W (éd.): Rare Earths Industry, Elsevier, p. 21-36. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802328-0.00002-4>
- Meinert LD, Robinson GR, Nassar NT (2016) **Mineral Resources: Reserves, Peak Production and the Future**. Resources 5(1): 14. <https://doi.org/10.3390/resources5010014>
- Mudd GM (2021) **Assessing the Availability of Global Metals and Minerals for the Sustainable Century: From Aluminium to Zirconium**. Sustainability 13(19): 10855. <https://doi.org/10.3390/su131910855>
- Niederberger T, Haller T, Gambon H, Kobi M, Wenk I (eds) (2016) **The Open Cut. Mining, Transnational Corporations and Local Populations**. eBook, ISBN 9781351050982.
- Nijens J, Behrens P, Kraan O, Sprecher B, Kleijn R (2023) **Energy transition will require substantially less mining than the current fossil system**. Joule: 7(11): 2408-2413. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.10.005>

OFEN (2023) **Statistiques de l'énergie solaire. Année de référence 2022.** Berne, Office fédéral de l'énergie. <https://pubdb.bfe.admin.ch/fr/publication/download/11461>

Ragonnaud G (2023) **Securing Europe's supply of critical raw materials (European Parliamentary Research Services).** [Briefing].

Sengupta M (2021) **Environmental Impacts of Mining: Monitoring, Restoration, and Control.** (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003164012>

Sovacool BK, Ali SH, Bazilian M, Radley B, Nemery B, Okatz J, Mulvaney D (2020) **Sustainable minerals and metals for a low-carbon future.** *Science*: 367(6473): 30–33. <https://doi.org/10.1126/science.aaz6003>

Sternberg T, Bolay M, Haller T, Niederberger T (2022) **The 'open cut' in drylands.** In: Kronenburg Garcia A et al. (eds.) *Drylands Facing Change. Interventions, investments and identities.* London, Routledge, Taylor & Francis. P. 93-111.

Subramaniam V (2019) **A policy fit to diffuse? Examining the effects of feed-in tariffs on the trade-based diffusion of select renewable technologies.** Master's dissertation, Geneva Graduate Institute.

Swiss Academy of Sciences (2016) **La Suisse et le négoce des matières premières – Etat des lieux et perspectives.** *Swiss Academies Factsheets* 11(1).

Swissolar (2024) <https://www.swissolar.ch/fr/news/detail/l-electricite-solaire-fournira-10-de-notre-consommation-annuelle-en-2024-51518>

US GAO (2022) **Critical Minerals-Building on Federal Efforts to Advance Recovery and Substitution Could Help Address Supply Risks** (GAO-22-104824). United States Government Accountability Office.

USGS (2019) **Mineral Commodity Summaries 2019.** U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/70202434>. <https://pubs.usgs.gov/publication/70202434>

WRF/RMF (2023) **Extractive commodity trading report 2023.** World Resources Forum und Responsible Mining Foundation.

WTO (2022) **Trading into a bright energy future. The case for open, high-quality solar photovoltaic markets.** Rapport. https://www.wto.org/english/res_e/booksp_e/energyfuture2021_e.pdf

Qui sommes-nous ?

Les **Académies suisses des sciences (a+)** regroupent les cinq académies scientifiques suisses, l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT), l'Académie suisse des sciences humaines et sociales (ASSH), l'Académie suisse des sciences médicales (ASSM), l'Académie suisse des sciences techniques (SATW) et la Jeune Académie Suisse (JAS). Elles comprennent en outre les centres de compétences TA-SWISS et Science et Cité ainsi que d'autres réseaux scientifiques. Les Académies suisses des sciences promeuvent la collaboration entre les scientifiques à l'échelon régional, national et international. Elles représentent la communauté scientifique aussi bien sur le plan des disciplines qu'au niveau interdisciplinaire et indépendamment des institutions et des branches spécifiques. Leur activité est orientée vers le long terme et vise l'excellence scientifique. Elles se fondent sur les savoirs scientifiques pour conseiller les politiques et le public sur des questions touchant de près la société.

La **Commission élargie de l'énergie** des Académies suisses des sciences encourage et coordonne la discussion et l'échange de connaissances sur les thèmes de l'énergie et de l'utilisation durable des ressources au sein de la communauté scientifique et entretient le dialogue avec la politique et la société. Elle cherche la collaboration avec les hautes écoles et les hautes écoles spécialisées suisses et entretient un réseau de la communauté scientifique suisse sur le thème de l'énergie.

