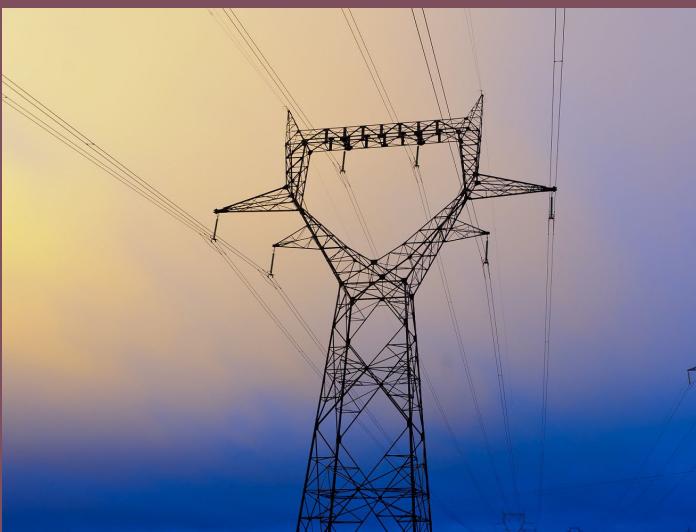




**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉNERGÉTIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

**PLAN DE PROGRAMMATION
DES RESSOURCES MINÉRALES DE
LA TRANSITION BAS-CARBONE**



Les ressources minérales critiques pour les énergies bas-carbone

**Chaînes de valeur, risques
et politiques publiques**

Rapport de synthèse du groupe d'experts
pour la programmation des ressources minérales
de la transition bas-carbone

Document édité par :

Commissariat général au développement durable

Juillet 2023

Présidence du groupe de travail

Dominique VIEL

Expert matières premières de l'Ademe

Alain GELDRON

Rédacteurs principaux

Julien HARDELIN et Michael WALKOWIAK* (CGDD/Service de l'économie verte et solidaire)

Co-réacteurs

Alain GELDRON et Dominique VIEL

Éric BUISSON*, Hugo JAKOMULSKI, Hélène LE BOEDEC et Mouna TATOU (DGALN/Direction de l'eau et de la biodiversité)

Hélène GAUBERT et Éric TROMEUR (CGDD/Service de l'économie verte et solidaire)

Faustine LAURENT* et Gaétan LEFEBVRE (BRGM)

Coordinateur

Julien HARDELIN

Avec l'expertise du BRGM, du CEA et de l'Ifpen

Remerciements

Ce rapport a été piloté conjointement par le Commissariat général au développement durable (CGDD) et la Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN), avec en appui, l'expertise du Bureau des recherches géologiques et minières (BRGM), du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA-EA) et de l'Institut français pour les énergies nouvelles (Ifpen).

Il a été réalisé dans le cadre d'un groupe de travail présidé par Dominique Viel avec l'appui technique d'Alain Geldron, ancien expert matières premières de l'Ademe. Des auditions ont également été réalisées.

Les auteurs de ce rapport remercient l'ensemble des participants au groupe de travail, les structures auditionnées pour le temps qu'elles ont consacré à ces travaux et la qualité de leurs interventions.

Nous dédions ce rapport à la mémoire de notre jeune collègue, Stéphane Gloriant, disparu tragiquement lors de la réalisation de ces travaux.

* En poste au moment de la réalisation du rapport

Liste des membres ayant participé à au moins un des quatre groupes de travail thématiques et / ou ayant contribué aux travaux sur le rapport de synthèse

Aimé Jérémie	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
Aixala Luc	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA-EA)
Antoine Loïc	Ademe
Autret Yannick	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/CGDD
Averbuch Daniel	Ifpen
Bain Pascal	Agence nationale de la recherche (ANR)
Bal Jean-Louis	Syndicat des énergies renouvelables (SER)
Bazzucchi Pierre	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Beelmeon Julie	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Berger Stéphane	Ministère de l'Économie et des Finances/DGE
Beroud Loïc	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/DGPR
Berthomieu Nadine	Ademe
Beylot Antoine	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
Bialkowski Anne	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
Biscaglia Stéphane	Ademe
Bollenot Martin	Ministère de l'Économie et des Finances/DGE
Boubault Antoine	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
Bourg Stéphane	Directeur de l'Ofremi - Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
Bouyer Étienne	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA-EA)
Brossard Jean-Luc	PFA (Plateforme filière automobiles)
Buchet Marie	Syndicat des énergies renouvelables (SER)
Buisson Éric *	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/DGALN
Burgun Françoise	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)
Burlet Hélène	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)
Charpiat Camille	Syndicat des énergies renouvelables (SER)
Cheverry Marc	Ademe
Clausset Nicolas	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Conan Stéphanie	Syndicat des énergies renouvelables (SER)
Courtine Thierry	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/CGDD
Danino-Perraud Raphael	Ministère des Armées
Delporte Vincent	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Delprat-Jannaud Florence	ANCRE-GP3
D'Hugues Patrick	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
Dion Axel	Ministère de l'Économie et des Finances/DGE
Ducreux Bertrand-Olivier	Ademe
Ferran Ghislain	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Florea Tudor	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Force Christine	Ministère de la Transition énergétique/DGEC

Franc Paul	Ademe
Gaillaud Jean-François	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/DGALN
Galin Rémy *	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/DGALN
Gallezot Benjamin	Délégué interministériel aux approvisionnements en minéraux et métaux stratégiques
Gaubert Hélène	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/CGDD
Gavaud Olivier	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/DGITM
Gay Aurélien	Délégué interministériel adjoint aux approvisionnements en minéraux et métaux stratégiques
Geiger Philippe	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Geldron Alain	Anciennement expert « matières premières » de l'Ademe
Georgelin Anne	Syndicat des énergies renouvelables (SER)
Gondia-Sokhna Seck	Ifpen
Guénard Vincent	Ademe
Hache Emmanuel	Ifpen
Hardelin Julien	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/CGDD
Homobono Nathalie	Ministère de l'Économie et des Finances
Iglesias Francis	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Israelian Alexandre	Ministère de l'Économie et des Finances/DGE
Jakomulski Hugo	Ministère de la Transition écologique/DGALN
Lambert Florence	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA-EA)
Laurent Faustine *	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
Lasfargues Sylvène	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Lassus Jean-Luc	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Leclerc Nicolas	PFA (Plateforme filière automobiles)
Lécureuil Aurélie *	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/DGALN
Lefebvre Gaétan	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
Leguerinel Mathieu	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
Manneville Thibault	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Marcus Vincent	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/CGDD
Marfaing Olivier	Ministère de l'Économie et des Finances/DGE
Marquer Didier	Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation
Maxime-Leclaire Élodie	Ministère de l'Économie et des Finances/DGE
Mehl Céline	Ademe
Mesqui Bérengère *	France Stratégie
Moizo Juliette	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/CGDD
Morville Jérôme	Syndicat des énergies renouvelables (SER)
Nicklaus Doris *	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/CGDD
Oliveros-Torro Guglielmina	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/DGALN
Parrouffe Jean-Michel	Ademe

Perdu Fabien	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA-EA)
Petit Brieuc	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Picciani Massimiliano	Bpifrance
Podesta Gwenaël	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Prévors Lionel	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Pochez Rémi	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/DGITM
Pommeret Aude	France Stratégie
Raimbaud Louis	ANCRE-GP2
Rosini Sébastien	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA-EA)
Sabathier Jérôme	Ifpen
Simon Jérémy	Syndicat des énergies renouvelables (SER)
Stojkovic Sandra *	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Tardieu Bernard	Académie sciences et technologies
Tarizzo Violaine	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Tatou-Breton Mouna	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/DGALN
Thiery Mickael	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Toulhouat Pierre	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
Tromeur Éric	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/CGDD
Vavasseur Sean	Syndicat des énergies renouvelables (SER)
Vergez Antonin *	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/CGDD
Vidal Olivier	Centre national de la recherche scientifique (CNRS)
Viel Dominique	Présidente du comité de pilotage « ressources minérales de la transition bas-carbone »
Viktorovitch Michel	Ministère de la Transition énergétique/DGEC
Villeneuve Jacques	Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
Volard Amandine	Ademe
Walkowiak Michael *	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires/CGDD
Wallard Isabelle *	Comité des métaux stratégiques (Comes)

*en poste au moment de la réalisation de ces travaux

Liste des entreprises et organismes auditionnés dans le cadre des travaux sur le photovoltaïque

Akuo Energy
Certisolis
Comité stratégique de filière
Direction générale des entreprises (ministère des Finances)
Direction générale de l'énergie et du climat (ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires)
ECM - Greentech
EDF
Ferropem
France Industrie
Institut photovoltaïque d'Île de France (IPVF)
Office franco-allemand de la transition écologique (OFATE)
Photowatt
PV Cycle
Recom Silia
Reden Solar
Rosi Solar
Sun Power
Veolia
Voltec Solar

Liste des entreprises et organismes auditionnés dans le cadre des travaux sur les réseaux électriques

Agence française pour l'hydrogène et les piles à combustibles (AFHYPAC)
ArevaH2Gen
Commission de régulation de l'énergie (CRE)
EDF
Enedis
Exxelia
G2ELab
Gimelec
Mahytec
Nexans
Réseau de transport d'électricité (RTE)
Saft
Schneider Electric
SNAM
Société de traitement chimique des métaux (STCM)

Liste des entreprises et organismes auditionnés dans le cadre des travaux sur la mobilité bas-carbone

Adionics
Airbus
Alstom
Carbone Savoie
CCFA (comité des constructeurs français d'automobiles), porte-parole de PSA et Renault
EDF/DREEV
Eramet
Fédération de recherche hydrogène (CNRS)
Institut Vedecom
Renault Trucks
SARP industries
ST Microelectronics
Solvay
Symbio
Umicore

Liste des entreprises et organismes auditionnés dans le cadre des travaux sur l'éolien

Arkema
Bouygues
Carester
David Rovere
Eiffage
Enercon
Extracthivé
FEE
IRT Jules Verne
Jeumont Electric
MagReesource
Nordex
Poma
Saipem
SER
Siemens Gamesa
Fernand Vial - Vial Consulting

Liste des acteurs/entreprises auditionnés dans le cadre du rapport synthétique

Bihouix Philippe
Institut du développement durable et des relations internationales
Saunier Duval
Terra Nova
Wee Metallica

SOMMAIRE

RAPPEL DU CONTEXTE.....	10
INTRODUCTION.....	12
I. LES CHAÎNES DE VALEUR DE LA TRANSITION BAS-CARBONE	13
II. LES RISQUES D'APPROVISIONNEMENT DES CHAÎNES DE VALEUR DES TECHNOLOGIES BAS-CARBONE.....	43
III. POLITIQUES PUBLIQUES ET RECOMMANDATIONS	91
ANNEXES : RÉSUMÉS DES RAPPORTS THÉMATIQUES DU PLAN DE PROGRAMMATION DES RESSOURCES DE LA TRANSITION BAS-CARBONE	111
PRINCIPALES RÉFÉRENCES	125
GLOSSAIRE, ABRÉVIATIONS ET SIGLES	127

Rappel du contexte

L'action 5 de la feuille de route sur l'économie circulaire d'avril 2018 prévoit que le ministère chargé de l'environnement « engagera sur la base des travaux du comité pour les métaux stratégiques (Comes) et du premier plan national des ressources, un plan de programmation des ressources jugées les plus stratégiques en l'accompagnant d'une politique industrielle ambitieuse de valorisation du stock de matières, en particulier pour les métaux critiques, contenues dans les déchets ».

C'est dans ce cadre qu'ont été lancés en 2019, par la secrétaire d'État Brune Poirson, les travaux d'élaboration pour planifier la programmation des ressources minérales de la transition bas-carbone. En effet, pour construire les infrastructures énergétiques indispensables à l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre qu'elle s'est fixés, la France est amenée à mobiliser davantage de ressources minérales, dont certaines sont critiques.

Ces travaux d'analyse pour la programmation des ressources minérales s'inscrit dans la continuité du plan ressources pour la France, publié en juin 2018, et inscrit dans la loi de transition énergétique pour la croissance verte. Celui-ci recommande d'améliorer les connaissances sur les besoins en ressources minérales induits par les politiques publiques et tout particulièrement par les politiques climatiques.

Les travaux de préparation du plan de programmation des ressources minérales de la transition bas-carbone portent sur quatre grandes familles de technologies bas-carbone : photovoltaïque, stockage stationnaire et réseaux (y compris les réseaux intelligents), mobilité bas-carbone et éolien. Ces familles ont été retenues car la transition bas-carbone se traduit par une électrification massive de l'économie et un développement sans précédent de ces technologies.

Les familles de technologies dans le domaine de la chaleur (solaire thermique, pompes à chaleur, biomasse, géothermie) ne sont pas étudiées dans ce plan. En effet, même si ces technologies concernent des domaines à fort potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre, leurs besoins en ressources minérales sont plus limités. Les technologies du nucléaire n'ont pas été incluses non plus dans le champ des travaux, car les objectifs fixés au lancement des travaux par les pouvoirs publics prévoyaient une diminution de la part du nucléaire dans le mix électrique français au cours des prochaines décennies. Dans le présent rapport, nous proposons néanmoins un encadré sur les technologies de la chaleur et un autre sur les besoins en ressources minérales rares pour la filière nucléaire.

Pour chacune des quatre familles de technologies retenues, les travaux ont eu comme objectif d'approfondir la connaissance des filières technologiques matures ou susceptibles de l'être dans les dix ans à venir au regard :

- des besoins en ressources minérales qu'elles mobilisent et des enjeux associés, économiques, géopolitiques, environnementaux et sociaux ;
- des opportunités industrielles qu'elles présentent pour les entreprises françaises sur l'ensemble de leur chaîne de valeur, depuis l'extraction minière jusqu'au recyclage.

Ce plan a vocation à éclairer les pouvoirs publics et les décideurs sur les enjeux de la transition bas-carbone, en identifiant des leviers d'actions permettant de réduire les risques associés aux ressources à mobiliser, et de mieux exploiter les opportunités industrielles.

Ces travaux s'appuient sur l'expertise du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), et de l'IFP Énergies nouvelles (Ifpen). Ils associent les experts de directions générales des ministères chargés des politiques industrielles et bas-carbone, d'établissements publics, de structures de recherche, et d'organismes scientifiques. Ils sont enrichis par les auditions d'entreprises impliquées aux différentes étapes de la chaîne de valeur des technologies bas-carbone, objet des travaux.

Le présent document constitue le rapport de synthèse, qui fait suite à quatre rapports thématiques, relatifs à chacune des quatre grandes familles de technologies citées.

Les quatre rapports thématiques relatifs à chacune des quatre grandes familles de technologies



Introduction

Les années 2022 et 2023 sont marquées par le retour d'importantes tensions géopolitiques, en raison notamment de la guerre en Ukraine. Dans la continuité des chocs subis par les chaînes d'approvisionnement mondiales à la suite des premières crises des métaux (terres rares, nickel) et de la crise sanitaire débutée en 2020, bien des acteurs économiques, dont l'Union européenne, ont pris conscience de leur dépendance à des approvisionnements exposés à un ensemble de risques.

Par ailleurs, la transition bas-carbone, engagée en Europe à travers le Pacte Vert et le paquet *Fit for 55*, nécessite l'adoption massive de technologies qui permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre, en particulier dans la production d'énergie et les transports. Ces deux secteurs représentant en 2018 respectivement 26 % et 22 % des émissions de l'Union européenne¹, leur décarbonation est un enjeu crucial.

Selon l'Agence internationale de l'énergie² (AIE), l'année 2021 a constitué un record en matière d'installations mondiales de capacités de production d'énergies renouvelables, avec 290 GW mis en service. Ces nouvelles installations sont dominées par le solaire (près de 160 GW) et l'éolien. Mais le directeur exécutif de l'AIE³ note que cette nouvelle économie ne s'affranchit pas des contraintes des ressources naturelles, et que les prix élevés des métaux et de l'énergie présentent de nouveaux défis pour les industriels des technologies bas-carbone. De fait, de nombreux travaux de prospective montrent que la transition bas-carbone s'accompagne d'une augmentation importante de la demande en ressources minérales, à la fois en volume, en variété, et en qualité.

Le présent rapport de synthèse faisant suite aux quatre premiers rapports sectoriels, s'organise en trois parties :

- La partie I présente concrètement les différentes étapes des chaînes de valeur des technologies bas-carbone : procédés techniques, logiques économiques et impacts environnementaux et sociaux.
- La partie II fait le point sur les différents risques identifiés sur l'approvisionnement en ressources minérales, qu'ils soient du côté de l'offre, de la demande, des structures des marchés concernés, ou qu'ils portent sur des enjeux sociaux et environnementaux.
- La partie III présente les politiques publiques relatives aux ressources minérales déjà mises en place, et des recommandations destinées à limiter les risques et saisir les opportunités identifiées.

¹ CGDD (2022), Datalab, *Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde*, édition 2022.

² AIE, 2021, *Renewables 2021 - Analysis and forecasts to 2026*.

³ AIE, 2021, *Renewable electricity growth is accelerating faster than ever worldwide, supporting the emergence of the new global energy economy*, Press release.

I.

Les chaînes de valeur de la transition bas-carbone

Les travaux précédant le présent rapport ont porté sur quatre grandes familles de technologies qui permettent la conversion, le stockage et le transport d'énergie. Plusieurs chaînes de valeur ont ainsi été étudiées :

- Le solaire photovoltaïque, pour la production d'électricité (rapport d'étape n°1⁴) ;
- Les câbles et réseaux électriques, pour le transport de l'électricité et leur contrôle nécessitant des composants électroniques (rapport d'étape n°2⁵) ;
- L'hydrogène, avec les électrolyseurs et les piles à combustibles pour le stockage et la conversion de l'énergie (rapports d'étape n°2 et n°3⁶) ;
- Les batteries lithium-ion, qui permettent le stockage de l'électricité pour la mobilité bas-carbone et la stabilisation du réseau électrique (rapport d'étape n°3) ;
- Les machines électriques, qui incluent les génératrices d'éoliennes, et les moteurs électriques qui permettent la propulsion des véhicules électriques (rapport d'étape n°4⁷) .

Le tableau 1 présente pour chaque chaîne de valeur les ressources minérales les plus critiques. Les substances ont été étudiées avec la technologie la plus concernée, lorsqu'elles sont utilisées par plus d'une technologie. Aussi le tableau ci-dessous n'est pas un tableau récapitulatif de consommation par technologie.

Tableau 1 : liste des substances étudiées dans le cadre du plan ressources

	Minéral	Chaîne de valeur utilisatrice
Rapport n°1 Photovoltaïque	Silicium	Solaire photovoltaïque, composants électroniques
	Tellure	Solaire photovoltaïque
	Cadmium	Solaire photovoltaïque
	Argent	Solaire photovoltaïque, composants électroniques
Rapport n°2 Réseaux électriques et stockage	Aluminium	Câblages électriques, structures mécaniques
	Cuivre	Câblages électriques, pour réseaux, génératrices, moteurs
	Plomb	Batteries à usage stationnaire
	Zinc	Batteries à usage stationnaire
	Gallium	Composants électroniques
	Germanium	Composants électroniques
	Tantale	Composants électroniques
	Titane	Hydrogène : électrolyseurs et piles à combustible
	Platinoides (ruthénium, rhodium, palladium, rhénium, osmium, iridium, platine)	Hydrogène : électrolyseurs et piles à combustible
	Béton	Structures mécaniques

⁴ CGDD, 2020, *Le photovoltaïque : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles*.

⁵ CGDD, 2020, *Les réseaux électriques - lignes électriques, stockage stationnaire et réseaux intelligents : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles*.

⁶ CGDD, 2022, *La mobilité bas-carbone. Choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles*.

⁷ CGDD, 2022, *L'éolien et les moteurs pour véhicules électriques : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles*.

Rapport n°3 Mobilité bas-carbone	Nickel	Batteries Li-ion
	Cobalt	Batteries Li-ion
	Lithium	Batteries Li-ion
	Graphite	Batteries Li-ion
	Manganèse	Batteries Li-ion
	Fluorine	Batteries Li-ion
Rapport n°4 Éolien et moteurs électriques	Terres rares (néodyme, praséodyme, dysprosium, terbium).	Générateurs pour éoliennes et moteurs électriques

Source : CGDD

L'acier n'a pas fait l'objet d'une étude, malgré son usage dans toutes les familles de technologies. En effet, il est utilisé sous différentes formes et alliages, ce qui complique l'identification de sa provenance. De plus les sources d'approvisionnement en minerai de fer et les centres sidérurgiques sont nombreux, et les capacités de recyclage déjà opérationnelles. Néanmoins, la transition bas-carbone entraînera une hausse de la demande pour l'acier, et des tensions sur certaines qualités d'alliages sont possibles. À court terme, la guerre entre la Russie et l'Ukraine, fournisseurs importants d'acier pour l'Europe, augmente les risques. Un risque potentiel à court terme existe en particulier sur l'approvisionnement en acier magnétique, cet alliage fer-silicium aux propriétés magnétiques importantes pour la conception des moteurs des véhicules électriques. Selon certains analystes, en l'absence d'investissements supplémentaires dans les capacités de production, l'offre pourrait être insuffisante pour satisfaire la demande à partir de 2025⁸.

Les technologies liées à la production et au stockage de chaleur, qui n'ont pas été étudiées dans le cadre de ces travaux, présentent l'intérêt pour la transition bas-carbone d'être faiblement dépendantes de ressources minérales (encadré 1).

Encadré 1 : technologies de la chaleur

Les besoins en chaleur sont un pôle majeur de la consommation d'énergie, sachant que plus de 40 % de la consommation finale y sont consacrés (dont 22,5 % à partir de renouvelable). La production de chaleur reste par ailleurs fortement carbonée : 60 % de sa production sont issus de la combustion de gaz, de pétrole ou de charbon. Il existe donc un fort potentiel de décarbonation de ce secteur. Les principales technologies qui permettent de limiter les émissions incluent la géothermie, la méthanisation, le solaire thermique et les pompes à chaleur pour la production, les réseaux de chaleur pour la distribution, et les systèmes de stockage. La géothermie et les pompes à chaleur sont les deux familles de technologies qui ont le plus retenu l'attention, pour deux raisons différentes :

- La géothermie est la technologie la plus intensive en métaux, puisque des alliages spéciaux (nickel, chrome, titane, molybdène et titane) sont nécessaires pour les forages et les canalisations en profondeur. Ceci pourrait constituer un enjeu à l'avenir dans le contexte d'un développement important de la géothermie en France, dans le cadre notamment du plan d'accélération du déploiement de la géothermie, qui vise à « augmenter de 40 % le nombre de projets de géothermie profonde lancés d'ici 2030 »⁹.
- Les pompes à chaleur et chauffe-eau thermodynamiques constituent un marché de masse. Les pompes à chaleur permettent de s'affranchir des chaudières gaz et au fioul à des fins de chauffage de bâtiments et d'eau chaude sanitaire. Néanmoins les besoins en ressources minérales de ces technologies sont limités.

⁸ Vittori, C., Evans, G., Fini, M., 2021, *Electrical steel – Another temporary supply chain shortage or a threat to OEMs' electrification plans?*, S&P Global Mobility.

⁹ Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, ministère de la Transition énergétique (2023), *Géothermie : Un plan d'action pour accélérer*.

Le secteur des pompes à chaleur et des chauffe-eau thermodynamiques est en forte croissance ces dernières années et mobilise 34 660 ETP en 2020 (augmentation de 67 % par rapport à 2018) et représente désormais 67 % des emplois des filières EnR¹⁰. La majorité de ces emplois étant dans l'installation, le forage et la distribution, ils sont par ailleurs peu délocalisables. De plus, le marché de la pompe à chaleur français est le plus important d'Europe. Les industriels du secteur bénéficient d'un marché domestique robuste, qui leur permet de se positionner à l'export. De fait, la filière des pompes à chaleur est l'une des rares filières EnR exportatrices nettes en France.

Par ailleurs, le stockage thermique a le potentiel d'apporter au réseau électrique une flexibilité bon marché par décalage de la demande, jusqu'à des durées au moins de l'ordre du mois, contre une journée pour les batteries.

Il faut souligner que l'OCDE¹¹ note en 2022 que la part de soutien public consacrée à la production de chaleur renouvelable est très inférieure à celle consacrée à la production d'électricité renouvelable ce qui, selon elle, rend plus difficile l'atteinte des objectifs de décarbonation de ce secteur.

Encadré 2 : les besoins en ressources minérales de la filière nucléaire

La filière nucléaire n'a pas fait l'objet d'un rapport thématique dans le cadre des travaux préparatoires du plan ressources. Il est cependant possible d'identifier les matières premières critiques autres que le combustible (uranium), dont dépendent les acteurs du nucléaire civil.

Le rapport n°11 de l'observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques (OSFME¹²), paru en mars 2022, étudie les matières premières critiques de l'industrie nucléaire. Le rapport distingue trois catégories de ressources minérales selon l'usage considéré : utilisation dans les gaines de combustibles nucléaires (zirconium, niobium et tantale), dans les barres de contrôle (indium, hafnium, cadmium, bore), matières premières pour la construction et de maintenance des centrales (béton, nickel, chrome, acier, aluminium, terres rares, etc.). Le rapport pointe notamment l'importance des besoins en zirconium, en niobium, en tantale, en indium, en hafnium, en cadmium et en carbure de bore, dont la consommation devrait fortement augmenter au cours des prochaines décennies, d'autant qu'aucune alternative n'existe actuellement.

Ces éléments sont indispensables au contrôle des réactions nucléaires, et nécessitent des approvisionnements réguliers de matières premières de qualité dite « nucléaire », puisque les gaines du combustible et les barres de contrôle ont des durées de vie limitées. Les marchés de matières premières, hors uranium, pour le nucléaire sont très spécifiques et les risques semblent davantage liés aux qualités nécessaires et à la concentration des producteurs qu'à la disponibilité géologique.

L'analyse des vulnérabilités liées aux ressources minérales de la filière nucléaire est difficile en raison du manque de données disponibles. L'étude prospective de l'Ademe *Transition(s) 2050* contient un volet sur les métaux¹³ qui propose une estimation des besoins sur la base des intensités matières de l'étude Surfer, mais précise clairement qu'il n'est pas comparable avec les autres technologies bas-carbone (hypothèses sur les technologies à venir, périmètre incomplet du système considéré, etc.).

Si la Chine et la Russie sont actuellement les acteurs majeurs du développement et de la vente de nouveaux réacteurs, ils ne disposent pas d'une position dominante ou privilégiée sur la production et le raffinage des matières nécessaires au fonctionnement des réacteurs.

Les enjeux spécifiques au combustible de la filière nucléaire ont été abordés par ailleurs dans le rapport n°5 de l'OSFME¹⁴, paru en septembre 2020 et intitulé *Les stratégies nucléaires civiles de la Russie, de la Chine et des États-Unis*.

¹⁰ Ademe (2022), *Marchés et emplois concourant à la transition énergétique dans les secteurs des énergies renouvelables et de récupération, des transports terrestres et du bâtiment résidentiel*.

¹¹ OECD (2021), *OECD Economic Surveys: France 2021*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/289a0a17-en>.

¹² Meyer, T., & Laboué, P. (2022). *Les matières premières critiques de l'industrie nucléaire : hafnium, indium, niobium, zirconium (Observatoire de la sécurité des flux et de la sécurité énergétique)*.

¹³ Ademe, 2022, *Transition(s) 2050 – Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique*.

¹⁴ Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques, 2020, *Les stratégies nucléaires civiles de la Chine, des États-Unis et de la Russie*.

Les études menées dans le cadre du plan ressources permettent de dégager les principales étapes du cycle de vie des métaux utilisés dans les technologies étudiées :

- L'extraction des ressources naturelles (par des mines et des carrières) et leur première transformation (minéralurgie) ;
- La purification et la transformation des matières par la métallurgie et la chimie ;
- La fabrication des composants, peu étudiée dans le présent rapport, faute de données disponibles ;
- L'intégration en système et leur exploitation ;
- Le recyclage en fin de vie.

Ces différentes étapes se distinguent par leurs localisations, les procédés et les facteurs de production utilisés, leurs déterminants économiques ainsi que leurs impacts environnementaux et sociaux.

A. L'extraction des ressources et les premières transformations

1. TECHNIQUES ET PROCÉDÉS

La première étape est l'extraction du minerai, dont les principaux types sont : les mines à ciel ouvert, les mines souterraines, les exploitations des *placers*¹⁵ et l'extraction par lixiviation *in situ*. Le choix du type d'exploitation dépend de différents paramètres : la géométrie du gisement, sa profondeur, la concentration en minéraux recherchée, les types de roches présentes, etc. La première transformation correspond au concassage et au broyage du minerai, puis à la séparation de ses éléments et à la concentration des minéraux recherchés.

Pour des gisements dont le sommet est proche de la surface, en général à moins de cent mètres de profondeur, les matériaux au-dessus du gisement sont extraits avant d'exploiter le minerai, parfois jusqu'à un kilomètre de profondeur. Dans ce cas l'exploitation est dite à ciel ouvert. C'est la méthode principale d'extraction du cuivre, par exemple dans la mine d'*Escondida* (figure 1), la plus importante au monde, située au Chili et détenue en majorité par BHP¹⁶, ou dans la mine de Bingham Canyon aux États-Unis, exploitée par Rio Tinto.

Figure 1 : mine de cuivre à ciel ouvert, *Escondida* (Chili)



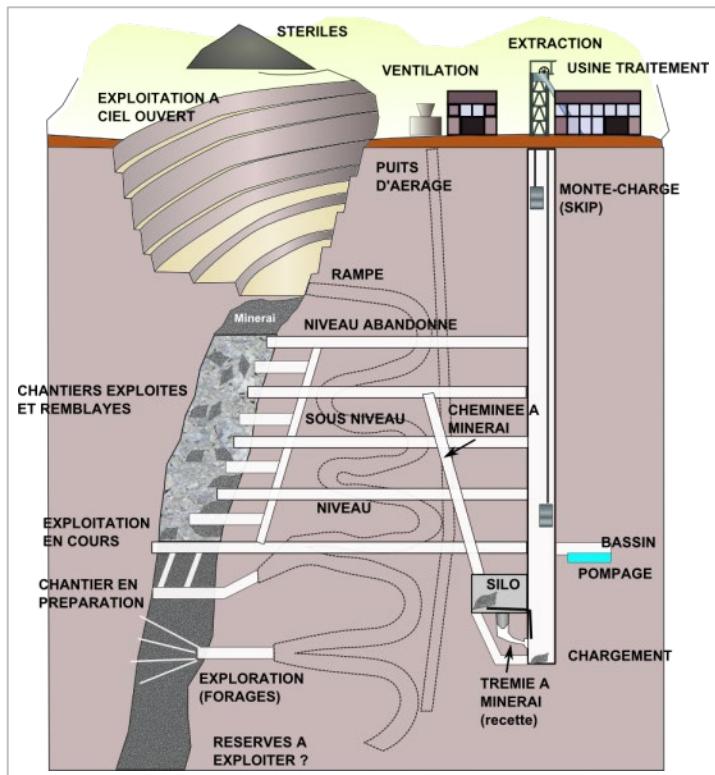
Source : BHP

¹⁵ Gisements souvent de type alluviaux.

¹⁶ Broken Hill Proprietary Company : grande entreprise minière diversifiée, faisant partie du groupe dit des majors.

Lorsque la profondeur du gisement est telle que l'exploitation à ciel ouvert nécessiterait d'extraire trop de volumes, ceci ajouté à d'autres paramètres tels que le type de roches présentes, leur dureté et la géométrie du minéral, il devient plus rentable d'accéder au gisement à partir d'un puits ou d'une galerie descendante, conduisant à de l'extraction souterraine (figure 2). De même, l'exploitation d'une mine à ciel ouvert atteignant une certaine profondeur peut se poursuivre en souterrain. Les mines les plus profondes sont les mines d'or en Afrique du Sud, à près de 4 km sous la surface. L'exploitation à plus grande profondeur pose de nombreux défis techniques et humains, notamment, car en l'absence de climatisation la température atteindrait 65 °C.

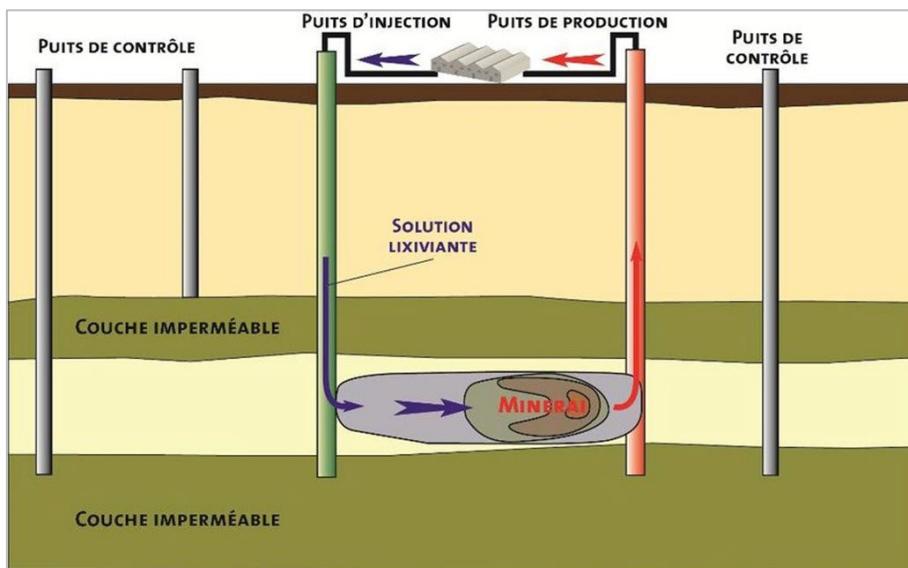
Figure 2 : coupe transversale illustrant les différents modes d'exploitation minière



Source : Institut Mines-Télécom

Un exemple de mine souterraine est donné par la mine de Kylylahti en Finlande, qui a extrait du cuivre, de l'or, du zinc, du nickel et du cobalt jusqu'en 2020. Un autre exemple est celui de l'ancienne mine de zinc, argent et germanium de Saint-Salvy dans le Tarn, active de 1975 à 1993 et dont le site a depuis été réhabilité.

D'autres types de gisements, plus rares, sont exploités par lixiviation *in situ* (figure 3). Dans ce cas, moins d'excavation est nécessaire puisque l'extraction se fait par l'injection d'une solution dite lixivante, qui réagit avec les minéraux recherchés et les dissout. Ensuite, cette solution est pompée vers la surface, et un traitement chimique permet de récupérer le minéral ainsi extrait.

Figure 3 : schéma d'exploitation par lixiviation in situ

Source : BRGM, *La mine en France* (2017)

Une autre méthode, la lixiviation « en tas », consiste à pulvériser la solution lixivante à ciel ouvert sur les minerais extraits du gisement. C'est le principal mode d'extraction des terres rares lourdes dans le sud de la Chine et en Birmanie.

D'autres types d'exploitations existent, comme l'évaporation de salars pour l'extraction du lithium ou le dragage de dépôts alluvionnaires. Les salars, ou « lacs salés », sont des aquifères caractérisés par une forte concentration en lithium sous forme soluble. On les trouve notamment en Amérique du Sud, dans le « triangle du lithium » (Argentine, Bolivie, Chili). Les saumures sont pompées, puis versées dans des bassins d'évaporation afin d'en augmenter la concentration en lithium. Après plusieurs mois, les saumures sont traitées chimiquement de façon à former des sels de lithium (par exemple : carbonate de lithium, hydroxyde de lithium, etc.).

Plus récemment, l'attention s'est également portée sur les opportunités offertes par les saumures géothermales. Les eaux géothermales contiennent en effet du lithium en concentrations très variables (15-500 mg/l)¹⁷. Bien que ces concentrations en lithium soient plus faibles que dans les salars (200 à 5 000 mg/l), les ressources géothermales en lithium pourraient permettre de diversifier les approvisionnements et de produire simultanément de la chaleur. Le projet EuGeLi (*European Geothermal Lithium Brine*) initié en 2019 a permis de caractériser les ressources géothermales en Europe et abouti à la première production de carbonate de lithium de qualité batterie issu de ces ressources¹⁸.

Une fois les minerais extraits, ils sont traités au cours d'opérations de minéralurgie afin de séparer les éléments chimiques recherchés et de les concentrer. En effet, les concentrations dans les minerais extraits peuvent être de l'ordre du pourcent (moins de 1 % pour les nouveaux gisements de cuivre par exemple, voire très inférieurs pour les métaux précieux tels que les platinoides). L'objectif de la minéralurgie est d'augmenter ce pourcentage et de rendre ce concentré compatible avec les opérations métallurgiques qui suivront.

Les traitements minéralurgiques sont d'abord mécaniques : broyage, concassage et tamisage afin de préparer le minerai aux étapes suivantes (figure 4). Ces étapes sont énergivores, certains broyeurs font jusqu'à 16 m de diamètre, et nécessitent plusieurs dizaines de mégawatts (MW) de puissance en entrée.

¹⁷ Sanjuan Sanjuan, B., Gourcerol, B., Millot, R., *Les saumures géothermales : une nouvelle ressource en lithium ?* Géochronique, 2020, Sur la route du Lithium, n° 156, 7 p.

¹⁸ Eramet, 2022, « *EuGeLi* : le projet se termine par un succès avec la première production de carbonate de lithium de qualité batterie ».

Une fois le minerai broyé, des procédés divers de séparation sont mis en œuvre. Les procédés sont adaptés au type de minerai extrait et peuvent être classifiés en grandes catégories souvent employées successivement : les procédés de séparation physique (par les différences de densité ou de propriétés magnétiques des différents éléments contenus dans le minerai, etc.), physico-chimiques (flottation, lixiviation, etc.), par calcination et plus rarement biochimiques. Lixiviation et flottation permettent de récupérer les éléments recherchés en les plongeant dans des solvants et réactifs chimiques, puis par flottation de récupérer les minéraux par différence de comportement des minéraux dans le milieu. La figure 4 présente par exemple les étapes de traitement du minerai contenant notamment du cuivre, du nickel et du cobalt de l'ancienne mine de Kylylahti en Finlande.

Figure 4 : machines de traitement du minerai de la mine de Kylylahti (Finlande, et contenant notamment cuivre, nickel et cobalt)



Note : de gauche à droite : broyeur, concasseur, cellules de flottation.

Sources : Altona Mining ; La mine en France (2017)

En ce qui concerne les procédés biochimiques, il existe également des procédés de biolixiviation en cours de développement¹⁹. Ceux-ci permettent, grâce à des bactéries, de limiter les besoins en traitements thermiques et chimiques, d'où de moindres besoins d'investissement en équipement industriel (les cuves de traitement sont soumises à de moindres contraintes de pression et de température), mais également une réduction de la consommation d'énergie des procédés, souvent en contrepartie de l'occupation d'une plus grande surface.

2. DÉTERMINANTS ÉCONOMIQUES

La présence de minéraux recherchés dans le sous-sol n'est pas suffisante pour permettre l'extraction de métaux. La concentration de minerai doit représenter des ressources²⁰ exploitables économiquement, qui sont alors qualifiées de réserves²¹. Une grande majorité de gisements contient plusieurs substances ou métaux d'intérêt.

D'un point de vue technique, la viabilité d'un gisement dépend de sa teneur en métal et du tonnage total de ce métal, ce qui entraîne un arbitrage entre qualité et quantité du minerai extrait. Ces éléments sont d'autant plus importants que les grands gisements fortement

¹⁹ BRGM (2020), Biolixiviation : une valorisation des minerais et des déchets, site internet du BRGM.

²⁰ Les ressources correspondent à une minéralisation dont l'enveloppe et le volume ont fait l'objet de premières estimations, à l'aide de sondages, de petits travaux miniers, de prospection en surface et/ou d'observations indirectes par géochimie, géophysique, etc. Les ressources sont qualifiées de « inférées », « indiquées » et « mesurées » par ordre de précision croissante obtenue en fonction de la quantité et du détail des travaux réalisés.

²¹ Les réserves se distinguent des ressources minérales par le fait qu'elles ont été identifiées précisément et sont considérées comme économiquement exploitables. L'estimation des réserves se fait sur la base de critères économiques (cours des métaux, taux de change, etc.), de contraintes commerciales et environnementales mais aussi des techniques d'exploitation et de traitement.

concentrés et proches de la surface ont déjà été exploités dans de nombreuses régions. Les potentiels nouveaux gisements sont répartis entre immenses gisements de faible teneur (par exemple le gisement de cuivre de Buenavista au Mexique, d'une teneur inférieure à 0,5 % pour des réserves de plusieurs millions de tonnes de minéraux) et petits gisements de forte teneur (le gisement de cuivre de Cobre Las Cruces en Espagne a une teneur de 5 % mais des réserves de moins de 500 kt). La baisse tendancielle des teneurs moyennes des gisements exploités nécessite d'utiliser de plus en plus d'énergie pour creuser plus profond et/ou broyer des volumes plus importants de roches (ce qui produit plus de déchets)²². Cette baisse demande également des évolutions des technologies et des procédés, pour permettre une récupération des métaux à un coût économique, écologique et énergétique acceptable.

Au-delà de la concentration du métal recherché, la présence d'autres éléments récupérables peut influer sur la viabilité du gisement. Ces autres substances sont des coproduits ou sous-produits, dont l'exploitation dépend de l'extraction des éléments principaux²³. Réciproquement, l'extraction de coproduits peut être nécessaire à la rentabilité de certaines exploitations, surtout lorsqu'elles sont de taille limitée. Par exemple le nickel est souvent un coproduit du cuivre ou des platinoïdes dans des gisements sulfurés polymétalliques, principalement au Canada et en Russie²⁴. 40 % de la production de nickel, se trouvant dans des gisements sulfurés, dépend de la production d'autres éléments²⁵.

Le type de sous-sol et de minéraux qui seront exploités influe sur le choix des procédés et sur la viabilité de l'exploitation. Par exemple un mineraï plus dur sera plus difficile à broyer. Un gisement profond sera plus coûteux à exploiter en souterrain qu'un gisement équivalent à faible profondeur, exploitable à ciel ouvert.

La viabilité d'un gisement dépend également de paramètres géographiques, environnementaux et politiques. Si le gisement est proche de zones industrielles et dispose d'infrastructures énergétiques et de transport accessibles ainsi que d'eau disponible en quantité, son exploitation en est d'autant simplifiée. Au contraire, des gisements éloignés des centres industriels et dans des zones désertiques sont plus à risque en cas de sécheresse par exemple²⁶.

Globalement, le développement de projets miniers est long, on compte de dix à trente ans entre les premières phases de prospection et le lancement de l'exploitation. Ce processus est par ailleurs risqué et capitaliste. La stabilité politique est donc primordiale pour les investisseurs qui se positionnent sur plusieurs décennies.

Ce temps long de développement rend peu probable l'exploitation à l'horizon 2030 de nouveaux projets qui ne seraient pas déjà en phase exploratoire. En particulier, en France, le sous-sol à partir des cent mètres de profondeur est relativement mal connu et certains métaux étudiés dans le cadre du plan ressources ont moins été recherchés dans les précédents inventaires miniers²⁷, dont le dernier a été finalisé en 1991. À l'inverse, des gisements jugés de moindre qualité par le passé, pourraient dans le futur être exploités, car de nouveaux procédés rendent possible la récupération de minéraux dans des gisements de faible teneur.

L'exploitation de gisements de teneur moindre est rendue nécessaire par la croissance de la demande en ressources minérales due à la transition énergétique au niveau mondial. En effet, la production secondaire de métaux par le recyclage, si elle est indispensable, ne sera pas suffisante²⁸, ni à court, ni moyen terme.

²² Néanmoins les mines souterraines en activité produisent moins de déchets, seules les zones minéralisées étant mobilisées pour être exploitées (ainsi que les galeries adjacentes pour y accéder). La méthode de déblai-remblai (*cut and fill*) favorise la réutilisation du matériau excavé et non valorisé (les CapEx et OpEx nécessaires à la mise en place sont néanmoins conséquents).

²³ Voir des associations usuelles de métaux dans les gisements sur la figure 2 *The wheel of metal companionability* de l'article Nassar, N.T. et al., 2015, *By-product metals are technologically essential but have problematic supply*, *Science Advances*, Vol 1, Issue 3, DOI: 10.1126/sciadv.1400180.

²⁴ Voir le rapport n°3.

²⁵ International nickel study group (2021), *The world nickel factbook 2021*.

²⁶ Attwood, J. et Biesheuvel, T., *Water scarcity is starting to bite in biggest copper supplier*, site internet mining.com.

²⁷ BRGM, 2021, *Évolution Base de données « Gisements France » : atlas des substances critiques et stratégiques - Rapport final*.

²⁸ Voir I.D du présent rapport.

3. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX

Comme toute activité industrielle, l'extraction et la transformation des ressources minérales primaires quelles qu'elles soient (minerais, sable, minéraux industriels, granulats...) peuvent se traduire par des impacts environnementaux et sociaux, qui sont cependant très variables selon les situations et la localisation, les procédés mis en œuvre, les cadres réglementaires, etc.

Les sections ci-dessous présentent les principaux impacts environnementaux et sociaux associés aux étapes d'extraction et de première transformation des métaux. Les exemples donnés sont à titre illustratif et ne sont pas représentatifs de l'ensemble des pratiques du secteur.

a) Impacts environnementaux

LORS DE L'EXTRACTION

L'extraction minière implique une consommation d'espace naturel, plus importante pour les exploitations à ciel ouvert que pour celles en souterrain, qui évitent par ailleurs la création d'une cavité béante dans le paysage. L'emprise au sol totale des mines de cuivre en activité en 2020 dans le monde représente 4 423 km², les deux plus étendues étant les mines chiliennes d'Escondida (230 km²) et de Chuquicamata (77 km²) (analyse du BRGM d'après Maus et al., 2020²⁹ et la base de données S&P). Cette consommation d'espace engendre des conflits d'usage, notamment avec l'agriculture ou le tourisme. Comme elle implique la destruction d'habitats naturels, elle impacte négativement la biodiversité³⁰.

Concernant l'énergie nécessaire aux travaux miniers, si certaines mines sont connectées au réseau électrique, la plupart se trouvent sur des sites isolés et n'ont pas d'alternative aux énergies fossiles : diesel, gaz naturel, pétrole ou charbon. Néanmoins, un nombre croissant de compagnies minières tentent d'opérer une conversion aux énergies renouvelables (solaire, éolien, biomasse, biogaz, géothermie).

Et, même si, comme en République démocratique du Congo, une majorité de l'énergie du pays est d'origine renouvelable (hydraulique principalement), les mines des sites isolés sont généralement dépendantes des sources d'énergie fossile³¹.

Les travaux miniers génèrent des déchets, les stériles miniers, dont les quantités varient selon le type de minerai, la localisation du site et la technique d'exploitation. Dehoust et al. (2020) proposent un indicateur pour mesurer la demande cumulée de matières premières de la production mondiale d'une ressource minérale³². Cet indicateur, qui comprend les stériles miniers, offre une illustration de cette variation à partir du calcul des stériles miniers générés par l'exploitation au niveau mondial de l'or et du cuivre. Les ordres de grandeur des stériles sont proches pour ces deux métaux : 2 232 millions de tonnes (Mt) par an pour l'or et 2 354 Mt/an pour le cuivre tandis que la production de ces deux métaux est très différente : 25 Mt/an pour le cuivre, 3 kt/an pour l'or.

Le mode de stockage des stériles miniers varie en fonction des sites, de leur composition et des contraintes techniques (par exemple : voie humide/voie sèche). Dans le meilleur des cas, ils sont réutilisés comme remblais.

D'autres impacts environnementaux associés à l'étape d'extraction sont :

- Les rejets de nitrates résultant des tirs de mine sont susceptibles de polluer les masses d'eau.
- Les émissions de particules fines et de polluants atmosphériques tels que les composés organiques volatils ou les oxydes d'azote qui entraînent la dégradation des écosystèmes dans leurs différents compartiments (air et, par transfert, eau, sols et sédiments).
- La modification du réseau hydrographique, les étapes d'extraction étant par nature invasives et susceptibles d'entrer en contact avec les nappes phréatiques. L'usage de réactifs peut entraîner de fortes pollutions des eaux de surface et souterraines (Chili, Pérou, Chine).

²⁹ Maus, V., Giljum, S., Gutschlhofer, J. et al., 2020, *A global-scale data set of mining areas*, Sci Data 7, 289.

³⁰ Sonter Laura J., Ali Saleem H. and Watson James E. M., 2018, *Mining and biodiversity: key issues and research needs in conservation*, scienceProc. R. Soc., B.2852018192620181926, <http://doi.org/10.1098/rspb.2018.1926> et Block, S. et Mollod, G., 2021, *Mining's Impact on Biodiversity: A Rising Risk?*

³¹ Smith D., Wentworth J., 2022, *Mining and sustainability of metals*, UK Parliament

³² Dehoust et al., 2020, *Environmental Criticality of Raw Materials. An assessment of environmental hazard potentials of raw materials from mining and recommendations for an ecological raw materials policy*.

Deux cas particuliers d'impacts environnementaux peuvent être mentionnés :

- Exploitation de salars par pompage, le cas du lithium
Lorsque l'exploitation du lithium met en œuvre l'évaporation de saumures, les bassins d'évaporation consomment des surfaces importantes. De manière générale, les exploitations existantes en Amérique du Sud ne recoupent pas de zones classées pour la protection de l'environnement (Dehoust et al., 2020). Les phénomènes de pompage-réinjection sont néanmoins susceptibles de perturber les écosystèmes, mais les mécanismes sont pour l'heure méconnus.
- Exploitation par lixiviation en tas, le cas des terres rares lourdes
Lorsque la lixiviation n'est pas mise en œuvre dans des conditions rigoureusement contrôlées et maîtrisées, il existe un risque de contamination des eaux profondes et de surface par les réactifs utilisés (comme le sulfate d'ammonium). Des gaz peuvent être rejetés par les réactions chimiques. Les injections peuvent fragiliser les structures des sols, et provoquer à terme des glissements de terrain. Les pratiques de lixiviation en tas des terres rares lourdes ont donc fini par être interdites en Chine (premier producteur mondial) au profit de la lixiviation *in situ* à partir de 2011, mais restent pratiquées dans certains pays (par exemple en Birmanie).

LORS DES PREMIÈRES TRANSFORMATIONS

Les procédés de minéralurgie requièrent de grandes quantités d'énergie. Le paramètre majeur est la teneur en métal du minerai, sachant que cette dernière tend globalement à diminuer. À titre d'exemple, l'indice de productivité de l'exploitation minière australienne en général ayant diminué de 50 % sur 12 ans, il faut désormais deux fois plus d'énergie pour produire la même quantité de métal³³. Les étapes de broyage et concassage représentent près de 30 % des consommations énergétiques sur l'ensemble des opérations minières pour les métaux de base, tandis que les étapes de séparation (flottation, lixiviation, grillage, filtration) en représentent 30 à 50 % (Dehoust et al., 2020). Il est fréquent que les usines de traitement minéralurgique soient localisées sur des sites isolés proches de la mine, ce qui les rend dépendantes des énergies fossiles. Le traitement du minerai mobilise une consommation d'eau difficile à évaluer, qui dépend en premier lieu de la teneur en métal du minerai, mais aussi du taux de recirculation de l'eau dans l'usine. Si le périmètre couvert par ces consommations d'eau varie selon les sources d'information, on peut raisonnablement retenir un ordre de grandeur de 0,2 à 1 m³ d'eau consommée³⁴ par tonne de minerai traité (dire d'expert).

D'autres impacts environnementaux associés à l'étape de traitement du minerai sont :

- Les émissions de particules fines (poussières) résultant du broyage et du concassage ;
- L'usage de réactifs (agents de flottation, cyanures, acides, bases, etc.) pour la flottation ou la lixiviation, qui peuvent entraîner la contamination des milieux si les rejets de ces réactifs ne sont pas correctement maîtrisés.

De plus, les traitements minéralurgiques produisent des résidus boueux ou aqueux en grand volume, appelés *tailings*, contenant des minéraux de gangue, des minéraux résiduels non valorisables, et éventuellement des réactifs. Leur gestion mobilise des pompes, convoyeurs, camions, etc., qui consomment de l'énergie. Leur stockage a lieu grâce à des digues dans des bassins couvrant parfois plusieurs km². En cas de fuite ou de rupture accidentelle de digue, le rejet à l'environnement de ces résidus entraîne la pollution des eaux de surface et souterraines. Dans le cas particulier de l'exploitation de minerais sulfurés, dont la pyrite est l'un des plus communs, il se produit un drainage minier acide (DMA) au sein des résidus stockés. Il s'agit de production d'acide par l'oxydation des sulfures sous l'effet de l'eau et de l'oxygène, qui attaque la roche et conduit à la mise en solution d'éléments traces métalliques. Les rejets de DMA

³³ Hool A., Schrijvers D. and Ganzeboom, 2022. *The energy-material nexus: CRM demand, CRM footprints, and their interplay*. Report from the IRTC-Business online workshop on 22 March 2022.

³⁴ L'eau est dite « consommée » lorsqu'elle n'est pas restituée au milieu naturel en sortie de procédé. Ceci est à différencier de l'eau dite « prélevée ».

entraînent la pollution des eaux et sédiments en métaux lourds et la perte de biodiversité aquatique. Par exemple, à Baia Mare (mine d'or en Roumanie), en 2000, une rupture de digue a entraîné le déversement de 100 000 m³ de DMA chargés en cyanure, qui ont contaminé le Danube sur plus de 2 000 km³⁵.

Enfin, un cas particulier est celui de la contamination des résidus d'exploitation des terres rares aux éléments radioactifs. L'exploitation de certains minerais à terres rares (*voir rapport d'étape n°4*) permet le transfert d'éléments radioactifs, notamment le thorium, dans les résidus de traitement, ce qui conduit à une contamination radioactive du site et des alentours. Cette pollution radioactive est avérée à Bayan Obo en Chine, principale mine de terres rares légères. En France, à l'usine de Solvay à la Rochelle, spécialisée dans le traitement des terres rares pour la fourniture de produits intermédiaires à usage industriel (dépollution automobile, électronique, imagerie médicale, etc.), le thorium issu du traitement des concentrés est stocké.

b) Impacts sociaux

Comme le souligne un rapport pour le Parlement britannique sur la durabilité des activités minières, « l'exploitation minière a une relation complexe avec la société ; les ressources minières sont essentielles pour la production alimentaire, les infrastructures, la santé, l'assainissement, les transports et l'énergie. Cependant, l'exploitation minière peut avoir un impact négatif sur la santé, le bien-être, la sécurité, la prospérité et la culture des communautés, en particulier celles qui vivent à proximité des mines, des fonderies et des raffineries »³⁶. Cette dualité, inhérente à l'extraction minière, peut conduire à des situations extrêmes qui doivent inciter les acteurs en aval de la chaîne (entreprises, gouvernements, consommateurs) à être vigilants sur un certain nombre d'enjeux sociaux :

- Les droits fondamentaux des travailleurs, protégés par les conventions fondamentales de l'Organisation internationale du travail (OIT) : l'extraction du cobalt³⁷ au sud de la République démocratique du Congo est associée aux pires formes de travail des enfants (40 000 sont directement concernés) ; le recours au travail forcé des Ouïghours dans les filières de polysilicium du Xinjiang a été dénoncé³⁸ ; de même, les libertés syndicales et la liberté d'association des travailleurs sont fréquemment bafouées dans les juridictions où les minerais sont extraits et transformés, notamment en Birmanie ; de surcroît, des violations graves des droits de l'homme (travail forcé, travail des enfants) pourraient être associées à des activités criminelles (blanchiment d'argent, financement de conflits, etc.) ;
- La santé et la sécurité au travail³⁹ (dans des environnements à risque élevé s'ils sont mal maîtrisés), les conditions de travail (heure de travail et de repos, statut, accès à une assurance maladie, conditions de licenciement et indemnités de départ, etc.) ;
- La question du partage de la valeur ajoutée pour la société se pose à travers la définition du salaire décent, de même que la question des redevances et de la fiscalité, de l'existence d'une industrie en aval sur le territoire, ainsi que celle de la dépendance du territoire à l'activité minière (et donc de l'après-mine) ;
- D'autres enjeux concernent la société au sens large, comme la question de l'éthique des affaires, la corruption, le financement de forces de sécurité publiques ou privées, les conditions de déplacement et de relocalisation des populations ;

Les impacts sociaux sont généralement moins visibles à l'étape des premières transformations minéralurgiques, l'essentiel des conflits avec les populations locales portant sur l'exploitation minière. Les deux préoccupations principales à ce niveau concernent la sûreté des travailleurs ainsi que la gestion des résidus de traitement dangereux.

³⁵ Poulard F., Daupley X., Didier C., Pokrynska Z., D'Hugues P., Charles N., Dupuy J.-J., Save M., 2017. *Exploitation minière et traitement des minerais*, Collection « La Mine en France », tome 6, février 2017.

³⁶ POST (Parliamentary Office of Science and Technology). 2022. POSTbrief 45, *Mining and the sustainability of metals*. UK Parliament.

³⁷ Cobalt (utilisé dans les batteries) dont 70 % de la production minière provient de la République démocratique du Congo, parmi laquelle 10 % à 20 % sont d'origine difficilement tracables, indiquant la possibilité de provenance de mines illégales. Ajoutées à cela, la présence d'enfants dans l'exploitation artisanale de minerais et les conditions de travail de ces mines dénoncées à de nombreuses reprises, pour le cobalt comme pour d'autres minerais.

³⁸ Murphy, L., Salcito, K., Uluyol, Y., Rabkin, M., et al (2022), *Driving Force: Automotive Supply Chains and Forced Labor in the Uyghur Region*, Sheffield, UK: Sheffield Hallam University Helena Kennedy Centre for International Justice, December 2022.

³⁹ Volkswagen's Responsible Raw materials report, 2021.

Les impacts sociaux peuvent être étroitement liés aux impacts environnementaux des activités extractives. Ainsi, la consommation d'eau pour le traitement de minerai constitue une préoccupation d'autant plus grande pour les populations locales que les exploitations se situent en zone aride et créent un conflit d'usage sur la ressource en eau. C'est par exemple le cas au Chili, où plusieurs activités minières (dont les mines de cuivre) ont été interrompues par manque d'eau en 2020. 70 % de l'activité des six plus grands opérateurs miniers se trouvent dans des zones déjà en situation de stress hydrique (IRP 2020, cité par D'Hugues et al.⁴⁰). Par ailleurs, des accidents graves qui surviennent lors de la phase de traitement d'un minerai, comme la rupture accidentelle de digues, en plus de constituer une catastrophe environnementale, entraînent un lourd bilan humain, comme ce fut le cas de la catastrophe de Brumadinho au Brésil en 2019, pour laquelle on compte des centaines de morts et de disparus.

POINTS ESSENTIELS

- Face à la demande mondiale (transition énergétique des pays développés, croissance économique des pays en développement), l'ouverture de nouvelles mines est en marche et l'exploitation minière reste nécessaire à l'horizon 2050.
- En effet, tant la quantité que la diversité des minéraux nécessaires à la transition bas-carbone augmentent, sans que le recyclage ne puisse répondre à la demande croissante⁴¹. Un enjeu particulièrement important pour l'approvisionnement, aussi bien d'origine extractif que recyclé, est la qualité des métaux, qui peut être très hétérogène et ne pas convenir à tous les usages, notamment pour les technologies les plus en pointe. Chaque qualité constitue un marché en tant que tel, avec ses risques et ses opportunités propres.
- L'extraction des métaux nécessite une infrastructure industrielle très capitaliste et les projets miniers sont risqués et réalisés sur plusieurs décennies. Les principaux avantages comparatifs sur cette première étape sont la présence de gisements exploitables, la qualité des infrastructures (énergie, transport et eau) et la stabilité politique, qui permettent l'exploitation des gisements dans de bonnes conditions.
- La connaissance du sous-sol est un préalable à tout choix de développement. Cette connaissance est d'autant plus importante que les meilleurs gisements de surface ont déjà été exploités et que l'Europe possède un potentiel inexploité, mais tout à fait exploitable à horizon 2050⁴².
- Diverses méthodes d'extraction existent et sont choisies selon les caractéristiques du gisement exploité. Leurs impacts environnementaux diffèrent selon les procédés, mais ceux-ci sont tous énergivores, mobilisent d'importantes quantités d'eau et sont susceptibles de provoquer des rejets polluants. Ces impacts peuvent néanmoins être limités par des méthodes d'exploitation plus respectueuses de l'environnement, du travail et de la santé des populations locales, méthodes notamment développées par des organisations européennes. Il est également possible d'améliorer l'acceptabilité sociale des projets miniers à travers une plus grande concertation avec les parties prenantes.

⁴⁰ D'Hugues P., Christmann P. et Christophe D., 2022. *Mine responsable : est-ce possible ?*, dans *Métaux critiques – concilier éthique et souveraineté ?*, Géosciences n° 26, juin 2022, pp. 48-53.

⁴¹ Et en cas de demande stable, il ne pourrait au mieux, dans des conditions théoriques idéales, couvrir que 80 % des besoins.

⁴² Si les procédures d'exploration et d'exploitation étaient lancées prochainement.

B. La purification et la transformation des matières : la métallurgie et la chimie

1. PRINCIPAUX PROCÉDÉS

La métallurgie et la chimie permettent de passer du minerai concentré aux métaux utilisables dans les technologies considérées et leurs composants. Ceci passe par plusieurs étapes : l'extraction des éléments métalliques du minerai (procédés de réduction) ; la purification (ou affinage) du métal ou de l'alliage ; la transformation (mise en forme).

Les procédés métallurgiques sont diversifiés et dépendent de la nature du minerai ainsi que du type de produit visé. Trois grandes familles de procédés sont la pyrométallurgie, l'hydrométallurgie et l'électrométallurgie. Ces procédés sont souvent associés à différentes étapes du traitement des métaux, mais ils peuvent constituer des méthodes alternatives pour obtenir les mêmes produits finaux, comme le souligne l'*encadré 3* sur la métallurgie du cuivre.

a) La pyrométallurgie

La pyrométallurgie consiste en un traitement thermique du métal. En matière de tonnage, c'est le procédé le plus courant pour la production de métaux, notamment les minerais oxydés ou sulfurés.

Souvent, le minerai oxydé est réduit à haute température par des composés solides carbonés (le charbon étant l'exemple le moins coûteux) ou gazeux (l'hydrogène, plus cher, utilisé pour les oxydes de terres rares, voir rapport n°4), ou plus rarement d'autres métaux (le titane est réduit en présence de magnésium, voir rapport n°2). Les réactions de réduction avec des composés carbonés, comme le charbon, produisent du monoxyde de carbone ou du dioxyde de carbone, qui sont des gaz à effet de serre. L'usage de dihydrogène, plus coûteux, permet de réduire ces émissions s'il est produit à partir de ressources renouvelables.

Certains minerais ne sont pas oxydés, mais sulfurés (comme 80 % du cuivre et 40 % du nickel extraits, ainsi qu'une partie des minerais contenant de l'argent) et grillés pour obtenir des oxydes métalliques. Lors de ce grillage, du dioxyde de soufre est émis, responsable de pluies acides lorsqu'il n'est pas capté.

Outre ces gaz, les procédés pyrométallurgiques produisent des déchets sous forme de scories ou *laitiers*, qui contiennent sous forme solide les impuretés contenues dans le minerai initial. Dans de nombreux cas, ces déchets sont valorisés s'ils sont composés d'autres métaux, mais ils peuvent contenir des concentrations importantes de produits toxiques⁴³.

b) L'hydrométallurgie

L'hydrométallurgie est une autre famille de procédés métallurgiques, qui consiste en l'utilisation de réactions chimiques pour extraire les métaux dans les minerais. Ces méthodes sont souvent plus rentables que les procédés pyrométallurgiques pour les minerais de faible teneur (minerais de terres rares, ou métaux précieux comme les platinoïdes par exemple). Les coûts d'investissement et d'exploitation sont en effet inférieurs pour les usines hydrométallurgiques, car les solvants et l'eau utilisés sont relativement peu coûteux et peuvent être recyclés.

Les premières étapes de traitement sont la dissolution (ou lixiviation) du minerai ou d'une partie de celui-ci, par exemple dans une solution d'acide sulfurique. Le liquide obtenu ensuite est purifié, puis le métal recherché est extrait de la solution, soit par de nouvelles réactions chimiques, soit par des procédés d'électrométallurgie (voir I.B.1.c).

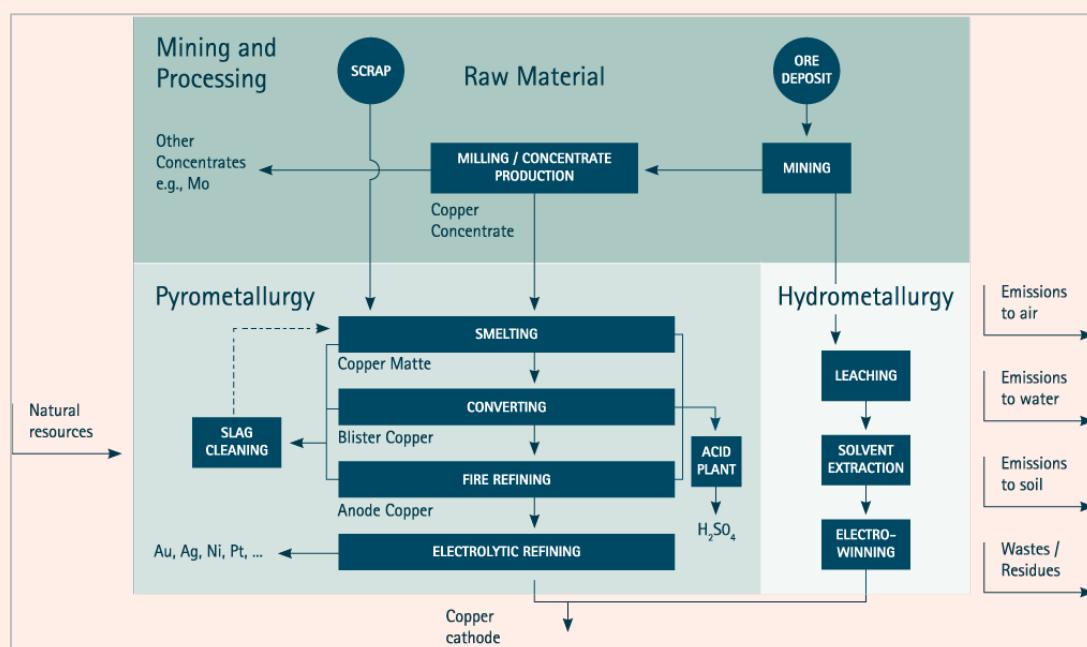
⁴³ Salisbury, D.F., 1998, « Some smelter slags represent a significant environmental hazard », *Science Daily*.

Néanmoins, les réactions chimiques tendent à être lentes, notamment la dissolution du minéral. Pour pallier cet inconvénient, des solutions consistent à augmenter la concentration des réactifs chimiques, à utiliser certaines bactéries (biolixiviation avec des travaux de recherche en cours⁴⁴) ou à augmenter la température dans laquelle la réaction a lieu. L'obtention de hautes températures nécessite d'augmenter la pression (pour éviter l'évaporation du solvant), ce qui augmente les contraintes sur les cuves de réaction, et donc le coût du procédé en contrepartie de l'accélération de la production. Ce choix est fréquent dans la production d'alumine à partir de bauxite, qui est une étape de la production de l'aluminium (*rapport n°2*).

Encadré 3 : exemple de la métallurgie du cuivre

Le minéral de cuivre peut être traité selon deux grandes voies (présentées sur la figure 5), pour obtenir des cathodes de cuivre pur à 99,99 %. La voie dite hydrométallurgique, ou SX-EW (Solvent eXtraction and ElectroWinning) est la plus directe et la plus récente. Elle est utilisée pour environ 16 % de la production totale⁴⁵. Le minéral nécessite peu de préparation et est dissout dans une solution d'acide sulfurique (solvent extraction), et le cuivre est ensuite récupéré sur des électrodes par électrolyse (electrowinning).

Figure 5 : procédés de production des cathodes de cuivre



Source : Copper Alliance, 2022

La voie alternative, dite pyrométauxurgique, permet de passer de concentrés de cuivre (entre 15 et 35 %) à des mattes de teneur comprise entre 40 et 60 %, puis à des *blisters* (95 à 98 % de cuivre) par des opérations de calcination et de fonte successives. Un raffinage thermique ou électrolytique permet finalement d'obtenir des cathodes, qui sont la forme classique du cuivre raffiné. Les cathodes produites par les deux voies sont identiques.

Les câbles électriques en cuivre, utilisés pour les réseaux électriques ou les bobinages des moteurs et éoliennes, sont ensuite obtenus par la fusion des cathodes pour obtenir des fils machines (*wire-bars*) qui sont tréfilés pour obtenir les câbles du diamètre voulu.

⁴⁴ Voir à ce sujet les travaux de recherche conduits par le BRGM : BRGM (2020), *Biolixiviation : une valorisation des minéraux et des déchets*, site internet du BRGM. La biolixiviation fonctionne en particulier pour récupérer l'or, le cobalt et le cuivre. Des travaux de recherche existent sur la récupération du nickel et du zinc.

⁴⁵ Selon le *World Copper Factbook 2021*, ICSG.

c) L'électrométallurgie

L'électrométallurgie englobe les opérations qui utilisent l'énergie électrique dans les opérations de transformation des métaux. D'une part, cette énergie peut être utilisée pour alimenter des fours, et rejoint ainsi certains procédés thermiques comme pour le silicium (*voir rapport n°1*). D'autre part, l'apport d'électricité entraîne des réactions chimiques dans les procédés d'électrolyse, par exemple pour la production d'aluminium à partir d'alumine (*voir rapport n°2*) ou les dernières opérations d'affinage du cuivre (*encadré 3*).

L'électrolyse est un procédé dans lequel un courant électrique circule entre deux électrodes dans une solution qui contient le métal recherché. La circulation du courant conduit les métaux à se déposer sur l'électrode négative (la cathode), ce qui permet son extraction, à la suite de sa dissolution et sa purification par hydrométallurgie.

Ces procédés sont électro-intensifs, par exemple, entre 13 et 16 MWh/t sont nécessaires pour transformer l'alumine (Al_2O_3) en Aluminium (Al) par le procédé de Hall-Héroult, ceci du fait de la haute température (960 °C) nécessaire pour maintenir l'électrolyte liquide, des pertes par effet Joule et de l'énergie électrique nécessaire à la réaction électrolytique. Ils produisent des résidus : deux tonnes d'alumine sont nécessaires à la production d'une tonne d'aluminium, ainsi que des gaz, notamment de l'hydrogène.

2. DÉTERMINANTS ÉCONOMIQUES

Si les procédés et technologies sont très variés selon les chaînes de valeurs étudiées, il est possible d'identifier des enjeux économiques communs. En particulier, les industries de la métallurgie et de la chimie sont dépendantes de la conjoncture économique, la demande en matériaux étant fortement corrélée au revenu national et au revenu par habitant⁴⁶.

Ces industries sont caractérisées par des barrières à l'entrée, en raison de leur intensité capitaliste, de l'importance de la technologie et de la qualification de la main d'œuvre, mais également par d'importantes économies d'échelle, qui justifient la recherche d'installations de grandes capacités. L'augmentation de la taille des usines au cours des cinquante dernières années a permis la réduction des coûts de production par l'augmentation de l'efficacité thermique et la baisse de la quantité de travail moyenne par tonne de métal, et on estime qu'un potentiel d'amélioration significatif existe encore pour les années à venir^{47, 48}. La taille des usines françaises, en moyenne plus faible que celle des concurrents étrangers, était déjà évoquée à la fois comme une faiblesse et comme un risque dans l'étude du pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations (Pipame) de 2015 sur les « mutations économiques du secteur de l'industrie des métaux non ferreux ».

D'un point de vue de la compétitivité-prix, l'accès à une énergie (électricité, gaz) à bas coût est déterminant. L'intégration verticale des groupes permet par ailleurs un accès stable aux intrants nécessaires aux opérations et la préservation des marges industrielles lors d'épisodes de hausse des prix des métaux. En contrepartie, l'intégration verticale rend plus difficile le partage des différents risques entre acteurs le long de la chaîne de valeur.

Cette intégration verticale est particulièrement marquée sur les marchés des métaux technologiques (comme les terres rares) et les applications les plus confidentielles des métaux industriels (silicium de qualité solaire, sulfate de nickel et graphite pour batteries, etc.). Il est ainsi notable que 50 % de la production de sulfates de nickel pour les batteries Li-ion (dont la production est en volume faible par rapport aux autres usages du nickel) se fasse dans des chaînes de valeurs intégrées (*voir rapport n°3*). De même, 85 % de la production d'aimants permanents à terres rares sont réalisés dans des groupes chinois intégrés verticalement.

⁴⁶ Voir par exemple Dahl, 2020, *Dahl Mineral Elasticity of Demand and Supply Database* (MEDS).

⁴⁷ Bodsworth, C., 1994, *The Extraction And Refining of Metals*, CRC Press.

⁴⁸ Gutowski T.G, Sahni S., Allwood J.M., Ashby M.F., Worrell E. (2013) *The energy required to produce materials: constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand*, *Phil Trans R Soc A* 371: 20120003.
<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2012.0003>.

Au contraire de l'extraction des ressources minérales et des premières transformations qui sont nécessairement localisées à proximité des gisements, le choix d'implantation des usines métallurgiques permet des arbitrages économiques. Les principaux arguments usuellement avancés sont la proximité avec les marchés finaux à forte croissance (notamment l'Asie), la compétitivité-coût (pour l'énergie et le travail), la stabilité politique et fiscale et l'accès à des infrastructures de transport, notamment des ports.

C'est sur cette étape que la concentration géographique apparaît la plus forte dans toutes les chaînes de valeur étudiées⁴⁹

3. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les impacts environnementaux au stade de la purification et de la transformation des ressources minérales diffèrent selon les procédés considérés.

Dans le cas de la pyrométallurgie, les procédés mis en œuvre nécessitent de hautes températures et sont énergivores, et en cas de combustion rejettent des gaz à effet de serre. Par exemple, l'exploitation du lithium de roches dures nécessite une étape de grillage du concentré dans un four chauffé à 1 050 °C par un brûleur au gaz. Les émissions de gaz à effet de serre sont importantes si la source d'énergie est carbonée (dans le cas du lithium de roches dures, de l'ordre de 15 tCO₂/t). Mais certains équipements (fours par exemple), ne peuvent, par conception, fonctionner qu'avec une source d'énergie fossile.

Dans le cas de l'hydrométallurgie, les impacts environnementaux viennent de la consommation d'eau, de la pollution de cette eau par des réactifs chimiques et du rejet de déchets sous forme de boues. Les déchets de la transformation de la bauxite en alumine sont les boues rouges, résidus caustiques responsables de la pollution des masses d'eau en cas de mauvaise gestion. Les quantités de boues rouges produites représentent, en moyenne, 0,7 à 2 tonnes par tonne d'alumine produite soit, dans le monde, 182 millions de t/an. Par ailleurs, dans le cas où le procédé d'hydrométallurgie engendre des oxydes, les opérations de métallisation de ces oxydes (par électrolyse généralement) sont nécessaires et engendrent des gaz à effet de serre (CO₂) dans la plupart des cas.

Enfin, dans le cas de l'électrométallurgie, les impacts environnementaux peuvent venir des résidus et des gaz produits par la réaction. Mais l'impact notable vient de l'importante consommation d'électricité nécessaire, et, si elle est produite à partir de combustibles fossiles, les émissions de gaz à effet de serre seront importantes.

Au total, ces impacts environnementaux montrent que l'accès à une électricité peu chère et peu carbonée est un avantage comparatif pour la mise en place de ce type de procédés. C'est pourquoi des pays comme l'Islande et la Norvège, qui disposent de sources d'électricité renouvelables abondantes (géothermie et hydroélectricité) restent les pays européens qui disposent des plus importantes capacités de production d'aluminium⁵⁰.

⁴⁹ Voir la partie II.D.1 du présent rapport et JRC, 2020, *Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study*, notamment par les figures 8 (batteries Li-ion), 19 (éolien) et 26 (solaire photovoltaïque).

⁵⁰ USGS, 2021, *Mineral Commodity Summary*.

POINTS ESSENTIELS

- Contrairement aux étapes d'extraction et de première transformation, la localisation des activités de chimie et de métallurgie peut être choisie.
- Les avantages comparatifs sur ces étapes des chaînes de valeur incluent les effets d'échelle (qui favorisent la concentration et les usines de grande capacité, en raison de coûts fixes et d'investissements importants), l'accès aux technologies les plus efficientes et à une force de travail qualifiée et expérimentée dans les procédés mis en œuvre. La qualité des infrastructures, notamment l'accès à une énergie à bas coût et la disponibilité de ressources en eau peuvent être déterminantes.
- L'intégration verticale apparaît comme un avantage compétitif pour des industriels, particulièrement dans des périodes d'augmentation des prix de marché des matières premières. L'intégration verticale semble également plus courante et avantageuse sur les segments de marché les plus confidentiels et pour lesquels peu de fournisseurs d'intrants existent, comme les métaux technologiques.
- Ces éléments expliquent pourquoi cette étape des chaînes de valeur fait apparaître les plus fortes concentrations géographiques.
- Les impacts environnementaux de ces étapes de traitement peuvent être très importants en l'absence de réglementation stricte, notamment en raison des rejets de déchets et de fumées chargées de substances polluantes. Les procédés mis en œuvre sont souvent énergo-intensifs, l'accès à des énergies décarbonées permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

C. L'intégration et l'exploitation des technologies

Il s'agit de l'assemblage, de l'installation et de l'utilisation des technologies de la transition bas-carbone. Les procédés et les enjeux sont plus diversifiés sur ces étapes que sur les autres segments de la chaîne de valeur, car elles dépendent essentiellement des caractéristiques des filières considérées. Ces étapes partagent le fait d'être plus intensives en travail et moins intensives en capital que l'extraction minière et la métallurgie. Elles sont aussi plus concentrées géographiquement au niveau mondial, principalement en Europe, en Asie de l'Est (Chine et Japon) et en Amérique du Nord.

Un autre point commun est leur plus grande dépendance aux chaînes d'approvisionnement. En effet, l'assemblage, l'installation et l'exploitation des différentes technologies nécessitent la disponibilité d'un ensemble de composants et de capacités de transport qui permettent de les acheminer. Toute fragilité de ces chaînes se répercute sur l'activité du secteur. Le cas des semi-conducteurs, composants électroniques, est un exemple récent de cette fragilité : la fabrication de ces composants est très concentrée en Asie, et des pénuries ont fortement impacté l'industrie automobile depuis 2021⁵¹.

Enfin, les marchés finaux de ces technologies, comme la fourniture de capacité de production d'électricité renouvelable, de batteries pour véhicules électriques, ou d'hydrogène, sont sensibles à la conjoncture économique et aux conditions de financement. Les marchés plus proches des utilisateurs finaux réagissent aux évolutions réglementaires et aux mécanismes publics de soutien au déploiement. Par ailleurs, la capacité des industriels à se fournir et à réaliser leur production selon des critères environnementaux, sociaux et de gouvernance (ESG) devient plus importante au regard aussi bien des consommateurs que pour des financeurs de projets industriels.

L'écoconception consiste à optimiser la conception d'un produit pour réduire son impact environnemental et faciliter son recyclage en fin de vie. Il s'agit d'une piste fondamentale pour réduire les impacts des technologies, tout comme l'allongement de l'utilisation ou le recours à la *low-tech* qui vise à réduire la sophistication des objets. Néanmoins, des initiatives qui visent à limiter la consommation de matières premières et l'émission de pollutions peuvent se répercuter sur les consommateurs finaux, à travers des prix plus élevés⁵² et une moindre disponibilité de certains produits et services. Ces effets doivent être anticipés afin de favoriser l'acceptabilité de la transition bas-carbone.

1. LES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

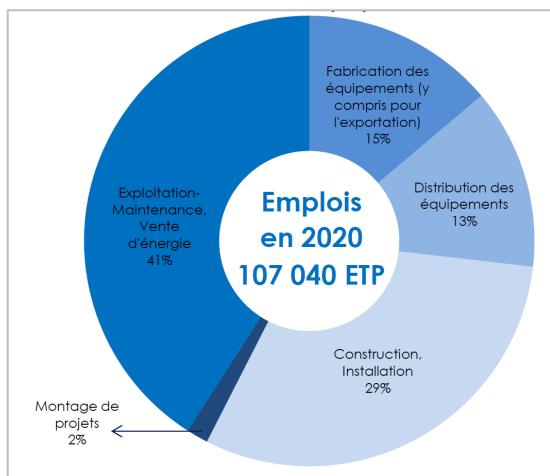
En l'absence de certaines chaînes industrielles de technologies de production d'énergies renouvelables, les étapes d'installation, d'exploitation et de maintenance des énergies renouvelables sont celles qui concentrent le plus d'emplois en France, comme le montre la figure 6. Au contraire, la chaîne de valeur des réseaux électriques est bien représentée en France, où sont installés les deux plus grands fabricants de câbles (Nexans et Prysmian), ainsi que les activités aval.

La figure 7, montre que les marchés les plus importants en France en 2019 sont ceux des énergies renouvelables électriques (éolien terrestre, photovoltaïque, hydroélectricité), alors que les filières qui emploient le plus de salariés sont celles de la chaleur et du bois-énergie. La répartition des emplois n'est pas corrélée à la taille des marchés pour différentes raisons (intensités en capital et en main d'œuvre différentes, étapes des chaînes de valeur concernées sur le territoire national, etc.).

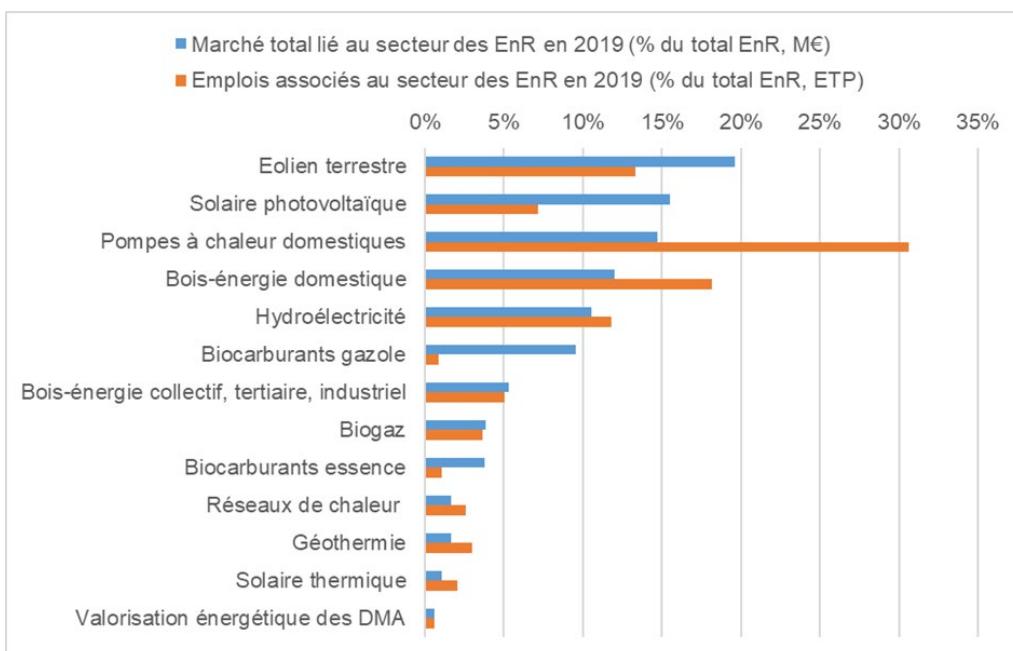
Cependant, le rapport du Conseil général de l'économie de 2017 sur les opportunités industrielles de la transition énergétique, indique qu'« en matière de fabrication d'équipements d'énergie renouvelable, l'industrie française n'est pas présente à un niveau correspondant à son potentiel ni aux dynamiques des marchés ». Ceci induit une dépendance aux chaînes de valeur internationales pour la fourniture de composants nécessaires aux systèmes d'énergies renouvelables.

⁵¹ Pour plus de détails, un encadré du rapport d'étape n°3 (p. 54) présente cette problématique.

⁵² Voir l'exemple de la greenflation : Grejbine, T., 2022, "Greenflation" : les enjeux de la première crise de la transition écologique.

Figure 6 : répartition des emplois dans le secteur des énergies renouvelables et de récupération en 2019

Source : Ademe, In Numeri, 2021. Marchés et emplois concourant à la transition énergétique dans le secteur des énergies

Figure 7 : taille des marchés des énergies renouvelables et de récupération et répartition des emplois par sous-segment

Source : traitement CGDD sur la base de l'Ademe, In numeri. 2021. Marchés et emplois concourant à la transition énergétique dans le secteur des énergies.

Un enjeu majeur des filières de production d'énergie est celui de la rentabilité énergétique. Cette rentabilité peut être mesurée par le *Energy Return on Investment* (EROI), ratio entre la quantité d'énergie consommée par un système et la quantité d'énergie délivrée par ce système. Au vu des études menées, il apparaît que^{53,54} :

- L'EROI des énergies fossiles conventionnelles (charbon, pétrole, gaz) est beaucoup plus élevé, entre 15-20 (pétrole) et 80 (charbon).

⁵³ Fizaine, F. et Court, V., 2014, *Épuisement des métaux et énergie nette dans une perspective de transition énergétique*, Florian Fizaine et Victor Court, Chaire d'économie du climat, Paris-Dauphine.

⁵⁴ Brockway, P. E., Owen, A., Brand-Correa, L. I., & Hardt, L. (2019). *Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources*. Nature Energy, 4(7), 612-621.

- L'EROI des énergies fossiles non conventionnelles (sables bitumineux, pétrole lourd, pétrole et gaz de roche-mère, kérogène) et des renouvelables modernes (éolien, photovoltaïque, géothermie, etc.) vers lesquels s'oriente la transition bas-carbone, se situe pour l'instant entre 5 et 20.

Des travaux plus récents suggèrent cependant que les différences d'EROI pourraient être nettement moindres entre les fossiles d'une part et les renouvelables d'autre part, dès lors que les calculs prennent en compte non seulement la production primaire d'énergie, mais aussi l'énergie utilisée dans les étapes de transformation, de transport et de distribution. Ainsi, selon Brockway et al., en prenant en compte ces éléments l'EROI des énergies fossiles serait ainsi de 6:1 (au lieu de 30:1 en considérant seulement la production primaire), ce qui rapproche les ordres de grandeur de ceux observés pour les renouvelables. Cette possibilité de comparer les EROI repose en effet, en outre, sur une définition cohérente des périmètres des systèmes comparés⁵⁵.

2. LA MOBILITÉ BAS-CARBONE

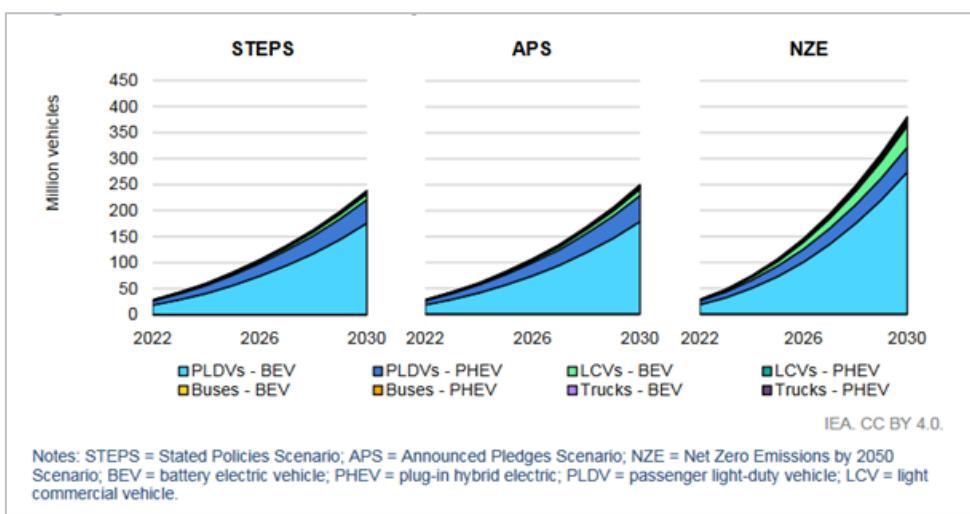
La mobilité constitue un marché de masse, fortement carboné, aux impacts environnementaux et économiques majeurs. La filière automobile, dont dépendent plus 737 000 emplois induits directement et indirectement soit 3 % de la population active occupée en France, est particulièrement concernée.

L'électrification de la motorisation automobile constitue un tournant critique dans lequel se sont engagés la majorité des constructeurs, dont les deux industriels français historiques Renault et Stellantis. Ce tournant impacte les coûts de production des véhicules, mais également les procédés et modèles d'affaire des constructeurs et du tissu de sous-traitants.

En particulier, le nombre de composants-clés d'un système de propulsion électrique (9) est plus faible que pour un moteur à combustion (30). Ceci implique que moins d'étapes de montage seront nécessaires, mais aussi que les équipements industriels devront évoluer.

L'autre grande différence imposée par l'électrification de la mobilité est le système de stockage de l'énergie électrique. Le rapport n°3 explique pourquoi les véhicules électriques à batterie seront plus avantageux pour la plupart des usages à horizon 2030. La demande en batteries lithium-ion (les plus couramment utilisées) va très fortement augmenter. La figure 8 montre cette tendance, qui sera portée par les véhicules particuliers (*passenger light-duty vehicles* en bleu clair), quel que soit le scénario considéré.

Figure 8 : projection du nombre de véhicules électriques à 2030

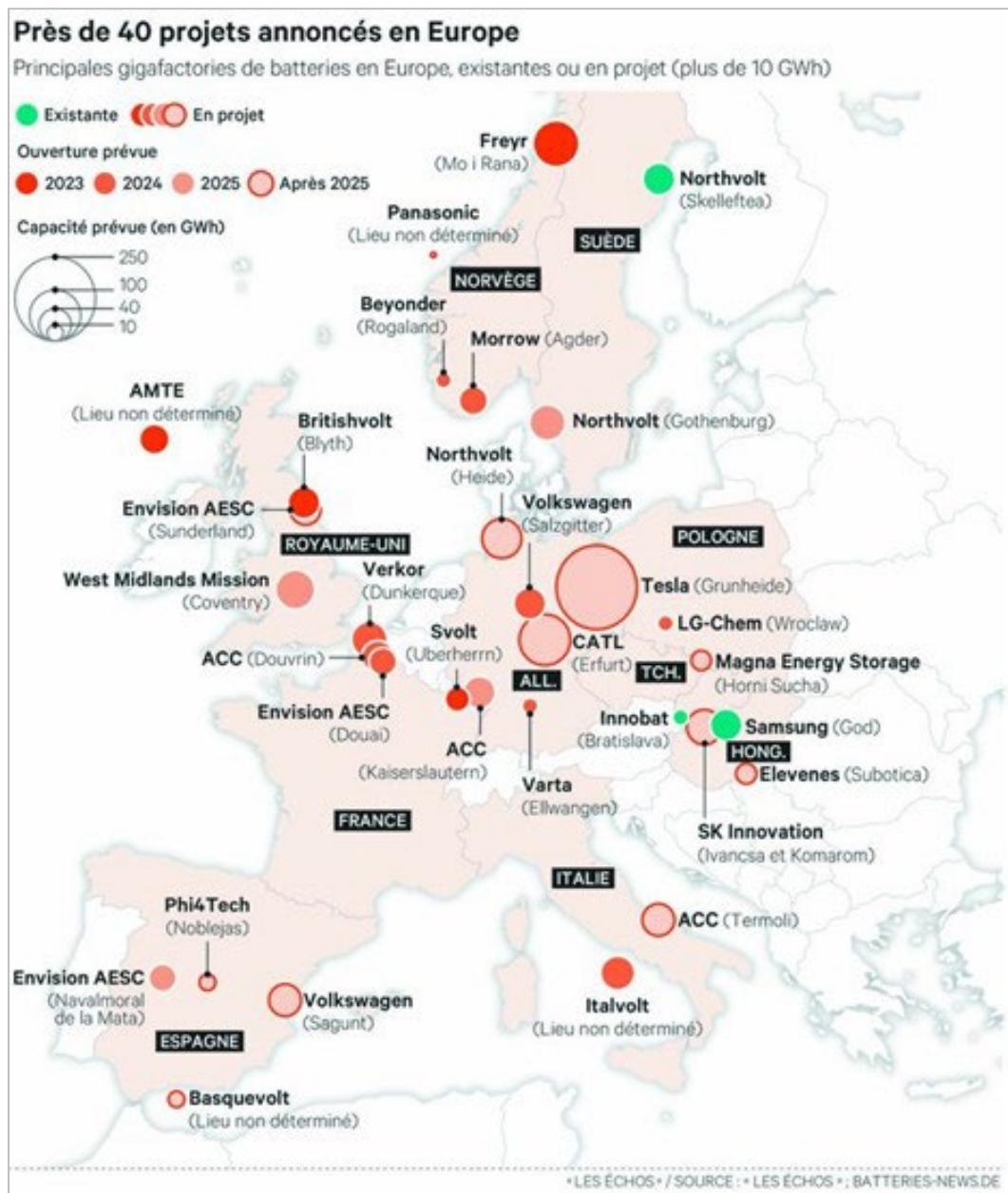


Source : AIE, Global EV Outlook 2023

⁵⁵ Raugei, M. (2019), Net energy analysis must not compare apples and oranges, *Nature Energy*, Vol. 4, pp. 86-88.

C'est pourquoi de nombreux projets de gigafactories voient le jour, non seulement en Corée et en Chine, où à l'heure actuelle, la majorité de la production de batteries Li-ion est concentrée, mais aussi en Europe, où de nombreux projets d'usines sont lancés comme montré sur la figure 9. L'Alliance européenne pour les batteries, créée en 2017 dans le cadre du partenariat EIT-InnoEnergy de l'Institut européen d'innovation et de technologie (EIT), a pour but de développer des projets industriels en matière de batteries dans l'Union européenne, en stimulant les échanges entre entreprises, enseignement et recherche, en finançant des produits et services innovants, en stimulant la création d'entreprises et en soutenant des formations universitaires dédiées.

Figure 9 : carte des projets de gigafactories en Europe



Source : *Les Echos*, 2022

Les caractéristiques de la fabrication des batteries et des précurseurs chimiques nécessaires sont proches des étapes décrites dans la partie I.B. En particulier, les procédés de fabrication sont énergivores, et les économies d'échelle importantes, d'où la volonté de construction d'usines de grandes capacités.

Un enjeu pour cette filière naissante est celui de la sécurisation des intrants. Dans le contexte de forte augmentation de la demande en matériaux pour batteries, garantir la quantité et la qualité des précurseurs de batteries sera un des défis auxquels les industriels seront confrontés. Cette sécurisation sera d'autant plus importante pour les sous-traitants automobiles que l'intégration verticale de la chaîne de valeur des batteries et moteurs pour véhicules électriques est l'un des leviers identifiés⁵⁶ d'amélioration de la rentabilité.

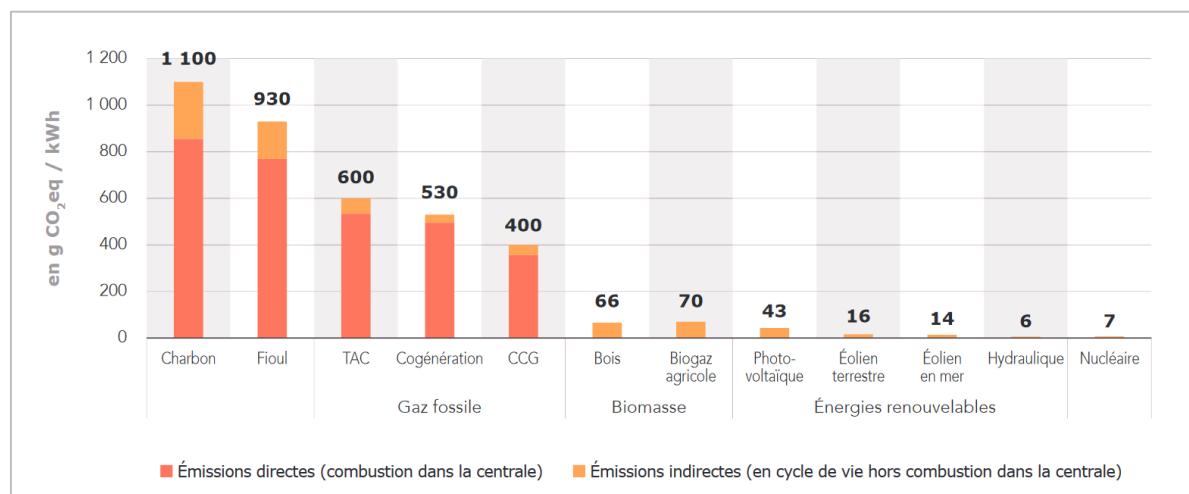
La production d'hydrogène, qu'elle soit à destination de la mobilité, de l'industrie ou à des fins de stockage stationnaire présente des caractéristiques similaires. En particulier, l'électrolyse de l'eau, principale méthode bas-carbone d'obtention de l'hydrogène, est fortement électro-intensive. L'accès à une électricité pas ou peu carbonée, ainsi que des coûts inférieurs aux coûts actuels, sont deux paramètres déterminants pour l'avenir de l'hydrogène bas-carbone.

3. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

a) Émissions de gaz à effet de serre (GES)

Dans le volet environnemental de son rapport sur les futurs énergétiques 2050⁵⁷, RTE montre qu'en prenant en compte l'ensemble du cycle de vie, les émissions de GES des technologies bas-carbone, hors biomasse, sont très inférieures (entre 6 et 43 gCO₂eq/kWe) à celles des centrales thermiques fossiles (entre 400 et 1100 gCO₂eq/kWe). Pour cette raison, elles ne seront pas davantage détaillées dans la suite du rapport.

Figure 10 : émissions en cycle de vie pour différentes filières aujourd'hui (émissions directes et indirectes)



Source : RTE, 2021

Concernant les autres impacts, les analyses ici présentées proviennent de rapports récents (RTE, Ademe, Enerplan/SER) sur les impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages.

⁵⁶ Évoqué notamment dans : www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/improving-battery-electric-vehicle-profitability-through-reduced-structural-costs

⁵⁷ RTE, Futurs énergétiques 2050 : principaux résultats, octobre 2021, chapitre 12 sur le volet environnemental.

b) Atteintes à la biodiversité

ÉOLIEN

Éolien terrestre

Le développement des éoliennes terrestres suscite des questions en matière d'impact sur la biodiversité : dérangement, gêne comportementale en vol, mortalité par collisions pour différentes espèces d'oiseaux⁵⁸ ou de chauves-souris (voir rapport n°4).

Éolien en mer

En mer, le fonctionnement des éoliennes engendre des impacts similaires à l'éolien terrestre pour la faune volante (gêne/blessure/mortalité). Le Conseil national pour la protection de la nature (CNPN)⁵⁹ indique cependant que, par mauvais temps, les impacts sur l'avifaune (reproductrice, migratrice et hivernante de l'Europe entière), peuvent être amplifiés par rapport à la terre. En effet, certaines espèces migrant habituellement de jour se voient ainsi obligées de migrer également de nuit et les turbulences des éoliennes créant des nappes de brouillard, la visibilité des oiseaux s'en trouve alors réduite. De plus, les oiseaux en mer ont tendance à voler à basse altitude⁶⁰ et à chercher des refuges, les rapprochant de la zone de danger des parcs marins éoliens. Dans son rapport de 2020, l'Ademe⁶¹ note de potentiels impacts de la pollution chimique générée par certains systèmes, comme les câbles par exemple (anticorrosifs notamment) sur les fonds marins et ajoute que ces « impacts gagneraient à être étudiés au vu du développement prochain de ces filières ».

À l'inverse il faut rappeler que les éoliennes peuvent avoir des effets positifs sur certaines espèces. Par exemple, sur terre, des études montrent que l'installation d'éoliennes peut réduire l'abondance de prédateurs d'espèces protégées telles que les tortues. De la même manière, les parcs éoliens marins peuvent constituer des abris pour certaines espèces. Chaque parc, sur terre ou en mer, fait l'objet d'une étude d'impact sur la biodiversité et le paysage et doit justifier que la zone choisie répond à la séquence « éviter » (il s'agit d'une zone de moindre impact), « réduire » (des mesures d'atténuations des impacts sont préconisées comme le bridage des pales, des dispositifs d'effarouchement, etc.) et « compenser » (des mesures de compensation écologique sont proposées, comme la restauration d'écosystèmes marins équivalents).

PHOTOVOLTAÏQUE

Selon RTE, la plupart des impacts du photovoltaïque sur les écosystèmes et la biodiversité concernent la perte et le changement d'habitats. En 2017, 70 % des centrales solaires installées dans le monde étaient au sol, occupant des étendues de terres de plus en plus vastes, fragmentant les habitats, constituant des obstacles au déplacement des espèces et à la disponibilité de leur nourriture.

Une étude menée par Enerplan/SER⁶², en 2020, indique que les impacts du photovoltaïque au sol sont différents suivant les composantes biologiques étudiées. Le rapport constate :

- pour la flore un impact positif⁶³ fréquent, à travers une plus grande richesse spécifique, due à l'apparition d'espèces pionnières ;
- un impact neutre pour les papillons de jour et pour les oiseaux ;
- un impact négatif pour les reptiles.

⁵⁸ Selon le rapport de la LPO de 2019 *Éoliennes et biodiversité : synthèse des connaissances sur les impacts et les moyens de les atténuer*, les roitelets à triple bandeau, les martinets noirs, les rapaces diurnes (faucon crécerelle, milan noir, milan royal, etc.) mais aussi les laridés (mouettes, goélands) sont les espèces que l'on retrouve le plus fréquemment sous les éoliennes terrestres françaises.

⁵⁹ « Autosaisine du Conseil national de la protection de la nature (CNPN) sur le développement de l'énergie offshore en France et ses impacts sur la biodiversité, le patrimoine naturel et les paysages » du 6 juillet 2021.

⁶⁰ Dans son rapport de juillet 2021, le CNPN écrit « Si une grande partie des oiseaux migre à haute altitude (passereaux, certains rapaces), les observations côtières et surtout l'usage d'un radar spécifiquement conçu pour ce type de suivi (les radars classiques étant inadaptés) montrent que beaucoup d'entre eux (flamands roses, rapaces, etc. mais aussi passereaux) volent également nettement plus bas, y compris à hauteur de pales. 25 % de la migration nocturne a lieu à moins de 200 m d'altitude ».

⁶¹ *Synthèse du rapport d'analyse et de comparaison des impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages - directs et indirects sur l'ensemble de leur cycle de vie*, août 2020.

⁶² *Étude de l'impact des parcs photovoltaïques au sol sur la biodiversité*, Enerplan/SER, décembre 2020.

⁶³ Le rapport indique que les termes « positifs » et « négatifs » employés servent à décrire les tendances d'évolution des différents composants biologiques étudiés et ne reflètent pas dans le cadre de ces analyses, de jugement de valeur mais une approche mathématique (tendance d'évolution vers la borne « + » ou vers la borne « - »).

Enfin, les centrales solaires de grande capacité peuvent affecter les microclimats. Par exemple, Enerplan/SER fait état de changements de température du sol autour d'une centrale solaire en Chine (entre 0,5 et 4 °C de moins au printemps et en été, et de plus en hiver) par rapport aux sites non équipés. Cet effet d'isolation serait dû à l'ombrage créé par les panneaux et à une modification des flux d'air autour de la structure.

Contrairement aux centrales au sol, les panneaux solaires sur les toits et les façades de bâtiment ont peu d'impacts, la plupart étant installés sur des structures existantes (en grande partie en milieu urbain), ce qui évite de convertir ou fragmenter les habitats. Lorsque les panneaux photovoltaïques sont combinés à une végétalisation du toit, ils peuvent servir d'habitat à certaines espèces végétales ou à des insectes et fournir des services écosystémiques dans les zones urbaines.

INFRASTRUCTURES DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

Dans la majorité des cas, les installations d'énergies renouvelables nécessitent un renforcement des réseaux existants et des raccordements de proximité, ce qui n'engendre pas de modifications supplémentaires : comme l'indique l'Ademe, la présence de lignes et de câbles électriques engendre une mortalité de la faune par collision ou électrocution et des perturbations liées aux champs électromagnétiques. Ces impacts sont connus pour l'ensemble des infrastructures de réseaux.

c) Occupation des sols/consommation d'espaces/artificialisation

ÉOLIEN

Selon RTE, l'occupation des sols due à l'éolien terrestre est peu questionnée. En effet, si l'emprise des parcs éoliens est plus importante que pour d'autres types d'équipements énergétiques (les pales peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres et nécessitent que les éoliennes soient suffisamment espacées entre elles – en moyenne, de 400 mètres –, ce qui entraîne une consommation d'espaces), les surfaces artificialisées et imperméabilisées sont de l'ordre de 0,2 hectare pour un parc éolien de 10 MW (de 3 à 4 éoliennes), ce qui est relativement faible. La surface totale située sous et autour des éoliennes reste disponible pour des co-usages (notamment agricoles). L'impact sur les sols de l'éolien en mer est peu évalué et dépend de la technologie déployée.

PHOTOVOLTAÏQUE

Les impacts sur les sols concernent l'emprise et le changement de température engendré par l'ombre des panneaux. Le rapport n°1 sur le photovoltaïque indique que pour atteindre les objectifs de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) de 45 GW de photovoltaïque installés en France en 2030, il faudrait en installer chaque jour environ 25 000 panneaux, soit l'équivalent de six terrains de football (à trouver) par jour. Les infrastructures de soutien (les voies d'accès et les équipements électriques) et l'exigence d'espacement des panneaux entraîneraient des besoins d'espace d'environ 2,5 fois la surface des panneaux eux-mêmes.

Pour remédier à cette emprise foncière, une mutualisation avec des usages agricoles (cultures céréalières, vignes, cultures maraîchères, etc.) est fortement encouragée. Par ailleurs, les parcs photovoltaïques au sol devraient être préférentiellement installés sur des surfaces déjà artificialisées (friches industrielles, décharges, terrils, anciennes carrières, etc.), afin de réduire leurs impacts sur la biodiversité. L'Ademe a publié juillet 2021⁶⁴ une étude sur des retours d'expérience d'agrivoltaïsme, avec ses avantages et ses inconvénients.

Étant donné le développement prévu des panneaux solaires photovoltaïques d'ici 2030, il conviendrait d'évaluer si la mobilisation des surfaces déjà artificialisées serait suffisante.

INFRASTRUCTURES DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

Selon l'Ademe, « les systèmes de raccordement et de stockage d'énergie renouvelable génèrent une emprise négligeable sur les sols en comparaison des impacts induits par les infrastructures de production d'énergie ».

⁶⁴ Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme, Ademe, juillet 2021.

d) Conflits d'usages

ÉOLIEN

Sous et autour des éoliennes terrestres, la surface non artificialisée est compatible avec les usages agricoles. Elle l'est également, dans une certaine mesure, avec les usages forestiers. En revanche, pour les éoliennes en mer, il y a des risques de conflits d'usage avec la pêche.

PHOTOVOLTAÏQUE

Comme pour l'éolien, la possibilité de co-usages notamment agricoles est à envisager (projets d'innovation dans l'agrivoltaïsme), mais les appels à projet sur le photovoltaïque favorisent plutôt les parcs à installer sur des surfaces peu valorisables à d'autres usages, comme les friches industrielles. Par comparaison, les appels à projet sur du bâti sont peu nombreux, bien que leurs impacts environnementaux soient plus faibles. En toile de fond, reste la tentation pour les agriculteurs de changer la destination de leurs terres, les revenus du photovoltaïque étant en moyenne plus élevés que ceux des terres agricoles, dans le modèle économique actuel.

INFRASTRUCTURES DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

Selon RTE, à terre, à part les surfaces supportant les pylônes, les surfaces sous les lignes sont disponibles pour d'autres usages non forestiers. RTE estime qu'en 2020, 342 000 hectares cohabitent avec le réseau de transport d'électricité, dont 4 000 hectares sont artificialisés et 200 hectares sont imperméabilisés, le tout représentant moins de 1 % de la totalité des surfaces artificialisées en France. Ce qui est vrai des réseaux existants le sera pour les systèmes de raccordement et de stockage des énergies renouvelables.

En mer, la possible altération des fonds marins par les infrastructures du réseau électrique reste à étudier.

e) Impacts paysager et visuel, et acceptabilité sociale

Le développement de grands projets d'infrastructures énergétiques fait régulièrement l'objet d'oppositions locales liées à leur impact paysager et visuel. Ces oppositions se sont amplifiées au cours des dernières décennies, en particulier autour du développement des réseaux électriques (pylônes, lignes à hautes, moyennes et basses tensions) et plus récemment des projets d'énergie éolienne. Néanmoins les impacts sur les paysages des systèmes de transport et de stockage dédiés aux énergies renouvelables ne leur sont pas spécifiques.

L'éolien représente les enjeux d'acceptabilité sociale les plus importants (*voir rapport n°4*), tandis que les installations photovoltaïques au sol, à dimension horizontale, sont plutôt bien acceptées.

Les contestations locales autour des projets d'éoliens cristallisent parfois un sentiment d'injustice à l'égard des centres urbains qui consomment davantage d'énergie, la population des zones rurales pouvant avoir le sentiment de subir les inconvénients de la transition énergétique, sans y voir de bénéfices directs.

Des solutions existent pour améliorer et préparer l'acceptabilité des projets éoliens. Dans les régions où l'énergie éolienne est déjà fortement développée, l'un des leviers majeurs est la planification de son développement. D'autres actions sont utiles comme :

- la création d'un médiateur de l'éolien, une des dix mesures⁶⁵ que la ministre de la Transition écologique a présentées le 5 octobre 2021 ;
- l'association d'une pluralité d'acteurs locaux aux décisions ;
- l'élaboration d'un « nouveau contrat social territorial autour d'un modèle économique équilibré et équitable » recommandé par le Conseil économique, social et environnemental en mars 2022⁶⁶ et dont une application pourrait être d'adosser les travaux des chantiers d'exploitation à des emplois locaux.

⁶⁵ Ministère de la Transition écologique, *Dix mesures pour un développement maîtrisé et responsable de l'éolien* (2021).

⁶⁶ https://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2022/2022_05_infrastructures_transition_energetique.pdf

POINTS ESSENTIELS

- Les technologies bas-carbone sont à l'heure actuelle majoritairement déployées dans trois zones géographiques : l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie de l'Est. À travers leur diversité, les marchés de ces technologies présentent des caractéristiques communes, comme la grande sensibilité au cadre réglementaire, la dépendance à des chaînes d'approvisionnement mondiales, une forte croissance et des besoins financiers importants.
- Le déploiement de capacités de production d'énergies renouvelables dépend de la disponibilité de sites aux caractéristiques favorables. De plus les questions d'acceptabilité sociale et des impacts environnementaux sont cruciaux pour leur déploiement harmonieux.
- L'électrification de la mobilité constitue un bouleversement majeur sur le plan industriel. Les *gigafactories* pour la production de batteries pour la mobilité et les électrolyseurs pour la production d'hydrogène connaîtront des enjeux similaires à ceux de la préparation des métaux, à savoir le coût de l'énergie, la maîtrise des technologies et des procédés et la sécurisation des intrants. La croissance du marché des véhicules électriques dépend notamment de la réglementation et de l'accès des ménages à la mobilité électrique, tant sur le plan de la disponibilité de l'offre que du pouvoir d'achat.
- Les analyses de cycle de vie conduites sur les familles de technologies renouvelables (solaire photovoltaïque, réseaux électriques, mobilité bas-carbone et éolien) concluent à un impact carbone globalement bénéfique par rapport à leurs alternatives à base d'énergies fossiles. Cependant, les technologies renouvelables peuvent également engendrer des impacts environnementaux négatifs (utilisation des sols, impacts sur les espèces migratrices, etc.) qu'il est important de prendre en considération.

D. Le recyclage

La forte croissance des marchés de la transition bas-carbone fait que le recyclage des métaux ne sera pas suffisant pour fournir les ressources minérales nécessaires au cours des prochaines décennies. Un exemple est donné par la mobilité électrique, où, dans un marché en croissance de 25 %/an et pour un produit dont la durée de vie est de 15 ans, le recyclage ne peut au mieux subvenir qu'à 3,5 % des besoins en phase de croissance (*voir rapport n°3*).

Le gisement de matières issues du recyclage est dit secondaire, par opposition à l'extraction dans les mines et carrières qui est dite primaire. Une différence importante entre ces deux gisements est l'importante dissémination géographique du gisement secondaire, constitué par les déchets, au contraire des dépôts géologiques qui sont concentrés en certains lieux.

1. LA FILIÈRE DU RECYCLAGE

Le recyclage des métaux est la dernière étape de leur cycle de vie. Ce recyclage débute par la collecte de déchets, se poursuit par le tri (souvent après une première étape de démontage et de broyage) et la séparation des métaux, puis rejoint les procédés de traitement métallurgiques et chimiques pour la purification et la réintégration dans les chaînes de production. La *figure 11* présente schématiquement les étapes du recyclage ainsi que les taux d'efficacité de conservation de la matière à chaque étape⁶⁷.

Figure 11 : étapes de la chaîne de recyclage et taux d'efficacité illustratifs pour les métaux



Source : *L'économie des ressources minérales et le défi de la soutenabilité, tome 2* (Florian Fizaine, Xavier Galiègue, 2021)

La première étape, rassembler les déchets et les transporter jusqu'à leur lieu de traitement, peut déjà causer des difficultés. C'est notamment le cas des petits aimants permanents à terres rares (issus de l'électronique ou de la mobilité électrique, et qui ne sont pas séparés des autres déchets) ou des batteries, qui tendent à être exportés en fin de vie et non recyclés en Europe, au risque de perdre l'accès direct au gisement. La captation des flux de déchets est le premier enjeu du recyclage. En France, des éco-organismes sont chargés notamment de cette étape de collecte des déchets.

La première séparation des déchets est ensuite une étape critique, avec des enjeux techniques et économiques. Le démontage de systèmes, parfois complexes, est intensif en main-d'œuvre et nécessite une connaissance préalable des déchets afin d'identifier les composants valorisables. De plus, contrairement aux minéraux extraits du sol, les déchets contiennent souvent des éléments carbonés, comme du plastique et des peintures. Ces éléments rendent plus difficile l'utilisation de traitements similaires à ceux de la minéralogie puisqu'ils tendent à créer des gaz et de la chaleur lorsqu'ils sont exposés à des hautes températures. En recyclage par voie métallurgique, les polymères sont d'ailleurs brûlés afin de les valoriser sous forme d'énergie.

La séparation des différentes matières est également plus complexe pour les déchets que pour des minéraux, en raison de la méconnaissance des contenus des déchets mais aussi de la plus grande diversité de métaux présents dans les déchets et de leur dispersion, notamment dans les

⁶⁷ Pour une définition rigoureuse des différents taux et ratios relatifs au recyclage, consulter le chapitre 4 de *L'économie des ressources minérales et le défi de la soutenabilité, tome 2* (Florian Fizaine, Xavier Galiègue, 2021).

alliages complexes. De plus, la plupart des installations sont conçues pour un flux optimal d'intrants, et leur adaptation est complexe face à la variabilité de la composition et du volume des déchets, causée par la saisonnalité, les changements de composition des produits, les habitudes de consommation, etc. Ces étapes de traitement sont très similaires à celles décrites dans la partie sur la purification et la transformation, notamment en ce qui concerne les débouchés et les économies d'échelle.

En France, la filière transformation et valorisation des déchets représente environ 20 milliards d'euros et 110 000 emplois⁶⁸. Toutes les filières matériaux sont concernées : métaux ferreux et non ferreux, déchets électroniques, granulats, verres, plastiques, bois, etc. Selon le Crédit Agricole, dans une publication de mars 2022, le marché français du recyclage des métaux a collecté 14 millions de tonnes en 2019. Par comparaison, en Europe et dans le monde, ce sont respectivement 200 millions et un milliard de tonnes de métaux qui ont été collectées cette année. Ce tonnage augmente en moyenne de près de 2 % par an, plus probablement par une plus grande quantité de déchets disponibles que par une plus grande efficacité.

L'industrie française du recyclage est structurée autour de grandes entreprises internationales (Véolia, Suez, Séché, Derichebourg, etc.) et de petites entreprises, dans les filières locales. En prévision d'un afflux massif de batteries Li-ion usagées, des partenariats se construisent entre spécialistes du recyclage (notamment Derichebourg, Véolia, Suez, Paprec, etc.) et chimistes/métallurgistes (Solvay, Arkema, Umicore, Orano, etc.). L'activité de R&D est importante dans le secteur et permet à des petites et moyennes entreprises⁶⁹ de se positionner sur des marchés porteurs du recyclage des métaux.

De même que pour les gisements primaires, le recouvrement de métaux dans les déchets fait l'objet d'un arbitrage technico-économique, qui dépend du volume de déchets à traiter, des concentrations de métaux dans ces déchets, d'éventuels coproduits, de la capacité technique à les extraire et de la valeur récupérable. En ce qui concerne les éoliennes, par exemple, l'acier (pour le mât) et le béton (pour le socle) ne présentent pas de difficultés de recyclage et peuvent s'insérer dans les filières déjà existantes. Le recyclage des pales est un enjeu, car celles-ci sont faites de matériaux composites. S'agissant des terres rares des aimants permanents, les faibles volumes en jeu à l'heure actuelle n'ont pas conduit à développer une filière en tant que telle, mais plusieurs entreprises françaises portent des projets d'innovation pour faciliter le recyclage des aimants permanents, et ainsi que des terres rares qui les composent⁷⁰. Dans le cas du photovoltaïque, l'éco-organisme Soren (anciennement dénommé PV Cycle) indique un taux de recyclage matière de 85 %, et de valorisation énergétique de 5 % (pour un total de 90 % de valorisation globale)⁷¹.

Cet arbitrage explique les différents taux de recyclage entre métaux. Il est possible d'expliquer le faible taux de recyclage des métaux technologiques par leur importante dilution dans les déchets électroniques (contrairement aux métaux de base et industriels, dont les volumes et marchés sont importants) et leur valeur limitée sur le marché (par rapport aux métaux précieux, dont les prix sont les plus élevés)⁷². Les cours des matières premières sont en effet un paramètre important dans le choix de recycler une matière, aussi bien que la taille des marchés qui servent de débouchés. Certains métaux rares et précieux (argent, platinoïdes, etc.) sont significativement plus concentrés dans les déchets que dans les gisements primaires, ce qui rend leur recyclage d'autant plus attractif. Pour les autres, notamment les métaux technologiques (gallium, tantale, terres rares) l'intervention des pouvoirs publics sous forme de soutien financier pourrait s'avérer nécessaire pour permettre le recyclage.

⁶⁸ FNADE, 2021, *La filière Transformation et Valorisation des Déchets renforce ses actions et développe de nouveaux axes de travail pour les 3 prochaines années*.

⁶⁹ Lors des travaux, les entreprises de recyclage Terra Nova Développement (déchets), WeeeCycling (déchets électroniques), SNAM (notamment batteries) ainsi que Carester et MagRessource (aimants permanents) ont été auditionnées.

⁷⁰ Pour plus de détails, voir le rapport consacré à l'éolien et aux moteurs électriques : CGDD, 2022, *L'éolien et les moteurs pour véhicules électriques : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles*.

⁷¹ Soren (2022), *Rapport d'activité 2021*.

⁷² Voir notamment Fizaine, *The economics of recycling rate: New insights from waste electrical and electronic equipment* (2020).

2. ENJEUX RÉGLEMENTAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX DU RECYCLAGE

La gestion des déchets est un enjeu majeur sur le plan environnemental et de la santé. Les filières à responsabilité élargie du producteur (REP) sont chargées de la fin de vie des produits. Elles permettent aux fabricants, distributeurs et importateurs de financer par leurs contributions, les opérations (collecte, tri, traitement, revente des matériaux) réalisées par les collectivités, les opérateurs des déchets et les acteurs de l'économie sociale et solidaire (ESS). S'agissant des technologies de la transition bas-carbone, il existe une filière REP sur le photovoltaïque, ainsi qu'une filière déchets des équipements électriques et électroniques qui peut traiter certains composants, et une filière déchets de l'automobile. La prise de conscience de l'importance du gisement secondaire de métaux pourrait favoriser la mise en place de filières à responsabilité élargie des producteurs lorsque le modèle économique de la filière sera démontré.

Cependant la mise en place de différentes filières de recyclage n'est pas aisée. Par exemple, dans certains cas, la réutilisation de produits (batteries, moteurs, etc.) peut faire obstacle à leur recyclage immédiat. De même, la réduction de l'usage de certains métaux dont les prix de marché sont élevés (comme l'argent ou les platinoïdes) peut réduire la rentabilité du recyclage, par réduction de la valeur capturable.

Les textes européens sont également importants pour les filières du recyclage des technologies bas-carbone : la directive déchets d'équipements électriques et électroniques (D3E), dont une révision aura lieu à partir de 2023, la proposition de révision du règlement sur le transfert de déchets⁷³ et la proposition par le Conseil européen en mars 2022, d'un règlement « batteries », visant particulièrement les batteries de véhicules électriques.

Le recyclage présente un intérêt double sur le plan environnemental. D'une part, il permet de minimiser le recours à l'exploitation minière et donc les impacts de celle-ci (la consommation d'énergie et les émissions de GES, réduites de plus de 80 % pour le cuivre et l'aluminium par exemple). D'autre part, il permet de réduire l'extraction de ressources finies, favorisant ainsi le développement d'une économie circulaire des métaux et de limiter la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre associés (réduites, par exemple, de plus de 80 % dans le cas du cuivre et de l'aluminium). Néanmoins, certains procédés de recyclage peuvent eux aussi engendrer des impacts environnementaux négatifs, de par l'utilisation de la chimie et de la métallurgie, en l'absence de réglementation environnementale stricte dans certains pays, comme vis-à-vis des émissions de gaz et de liquides nocifs.

POINTS ESSENTIELS

- Le secteur du recyclage des composants bas-carbone est le maillon le moins mature des chaînes étudiées car il se développe une fois que les déchets sont disponibles en quantité suffisante. Des rendements significatifs sont à attendre de l'investissement dans le recyclage, dans les nouvelles capacités de traitement et dans la R&D. Ce secteur est par ailleurs en partie dépendant des réglementations, s'agissant des REP, tant pour l'accès aux déchets que pour leur traitement.
- Les étapes amont du recyclage, qui incluent la collecte des déchets, leur tri et la première séparation des différentes matières sont déterminantes pour alimenter la filière. L'enjeu est ensuite de séparer les éléments afin de pouvoir fournir des intrants adaptés aux traitements suivants.
- Les étapes plus en aval du recyclage présentent une similarité avec les procédés minéralurgiques et métallurgiques, sur le plan des procédés, des technologies et des impacts environnementaux. En particulier, ces étapes présentent de fortes économies d'échelles, ainsi que de forts enjeux de localisation. En matière d'EnR (éoliennes, photovoltaïque), les filières de recyclage existantes ou en développement permettent de prendre en charge certains matériaux (par exemple : béton, acier), mais des innovations seront nécessaires pour d'autres (par exemple : terres rares, pales des éoliennes). Néanmoins, il ne faut pas oublier que, quel que soit le degré de maturité d'une filière, le recyclage ne peut jamais répondre au besoin en matières d'un secteur en croissance.

⁷³ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/qanda_21_5918.

II.

Les risques d'approvisionnement des chaînes de valeur des technologies bas-carbone

Cette partie présente les principaux risques d'approvisionnement qui pourraient affecter les chaînes de valeur des technologies bas-carbone dans les années à venir. À la différence d'autres études, les travaux du plan ressources n'ont pas cherché à quantifier la criticité ou les risques associés à ces chaînes de valeur, mais à les étudier qualitativement afin d'en identifier les vulnérabilités et les atouts. Outre cette analyse qualitative, les travaux du plan ressources se sont également basés sur les travaux existants en matière d'analyse des risques, en particulier les études de criticité et les travaux de prospective. Nous reprenons ici ces éléments, en les complétant par d'autres travaux récents et en les présentant sous forme synthétique pour en tirer une vue d'ensemble et quelques leçons générales.

Une première section (A) présente les définitions et cadres d'analyse utilisés habituellement, leur choix étant déterminant pour la portée opérationnelle des diverses études⁷⁴.

Les sections suivantes (B à E) présentent les principaux risques d'approvisionnement des chaînes de valeur des technologies bas-carbone, qui se regroupent en plusieurs grandes catégories qui peuvent interagir entre elles :

- Les risques d'offre, qui incluent notamment la disponibilité géologique, le caractère de sous-produit d'un minéral, la substituabilité dans les usages, le taux de recyclage potentiel, la concentration de l'offre, et les tensions politiques et géopolitiques ;
- Les risques économiques dont la variation de la demande, la volatilité des prix et le temps d'adaptation des capacités de production ;
- Les risques environnementaux et sociaux représentent la vulnérabilité aux impacts environnementaux, aux événements climatiques, à l'instabilité sociale, et à l'acceptabilité sociale.

Les risques identifiés dans le cadre des présents travaux sont de plusieurs ordres et pourraient se concrétiser à différentes échelles de temps.

A. Les méthodes d'analyse des risques : criticité, projections et prospectives

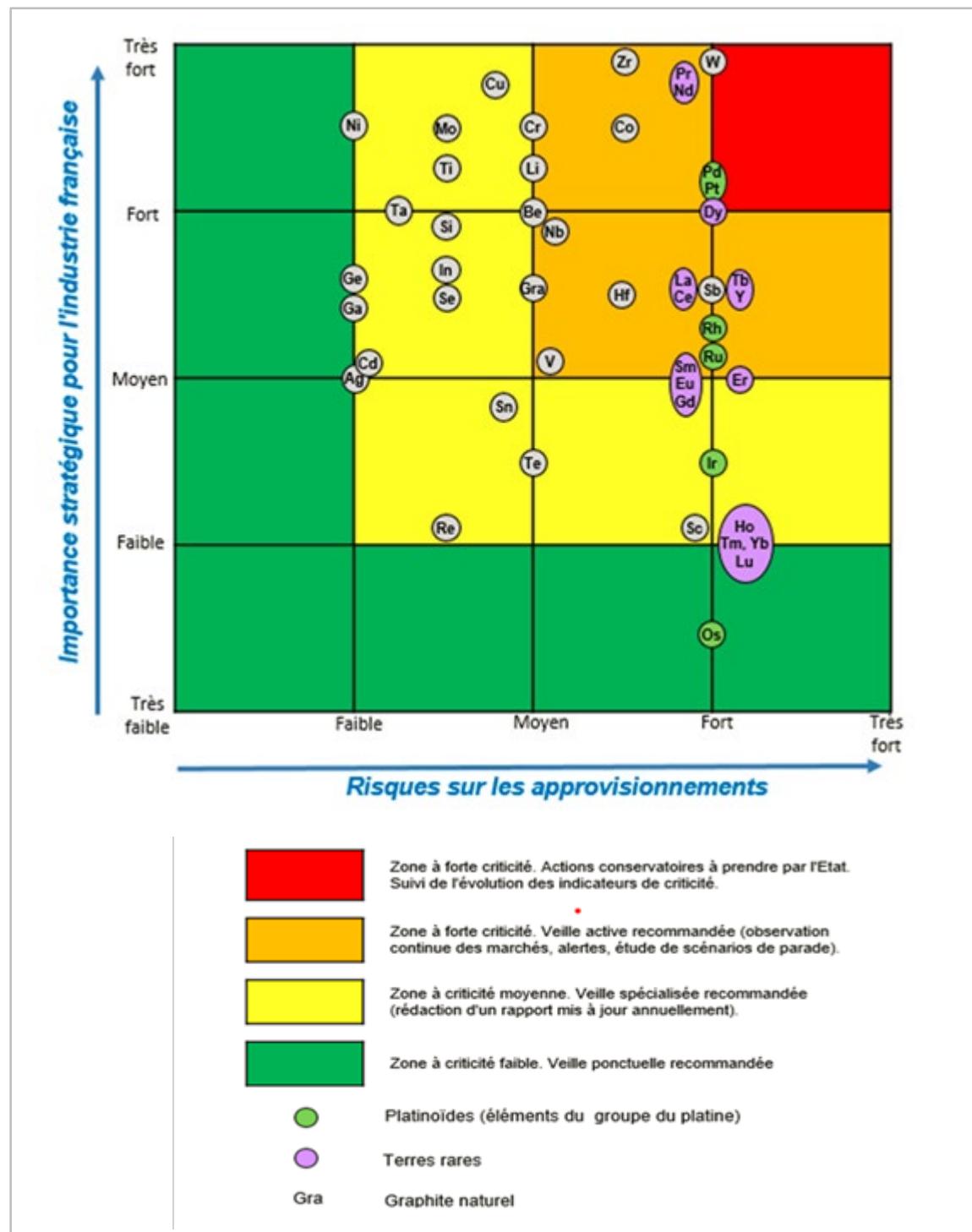
Plusieurs approches ont été développées pour analyser l'offre et la demande en ressources minérales nécessaires à la transition bas-carbone et évaluer les risques d'approvisionnement.

1. ÉTUDES DE CRITICITÉ

Un premier ensemble de travaux porte sur la « criticité » des ressources minérales (*raw material criticality*). Ces travaux, initiés aux États-Unis lors de la Seconde Guerre mondiale, consistent à établir, pour un pays ou un groupe de pays donné, une liste de substances définies comme critiques sur la base de deux critères : l'importance de la substance dans l'économie nationale (volet demande) ; le risque d'approvisionnement de cette substance, estimé de façon globale en prenant en compte des sources de risques variés : économiques, politiques, géopolitiques, environnementaux, etc. L'analyse de criticité consiste à croiser ces deux dimensions pour classer les substances selon leur degré de criticité. La figure 12 illustre ce croisement dans le cas de la France sur la base des travaux réalisés par le BRGM (Comes, 2021).

⁷⁴ Voir par exemple Machacek, E., Geoforum (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.03.028> pour la construction de la notion de criticité dans le cas des terres rares.

Figure 12 : évaluation de la criticité des substances étudiées par le BRGM depuis 2010



Source : Comes (2021) sur la base des données et analyses du BRGM

Dans un contexte de transition énergétique consommatrice de ressources minérales à relativement court terme, de nombreux travaux sur la criticité des substances ont été publiés au cours de ces dernières années, en particulier :

- Les travaux menés par la Commission européenne, avec la publication dès 2011 d'une première liste de 14 matières critiques, suivie par plusieurs mises à jour dont la dernière, publiée en 2020, comprend 30 matières critiques⁷⁵. Dans le cadre du projet de règlement européen sur les matières premières critiques (*Critical Raw Material Act*, CRM) présenté par la Commission européenne le 16 mars 2023⁷⁶, la Commission a proposé une nouvelle liste de 34 matières critiques.
- Les travaux du BRGM qui depuis 2010 produisent des monographies par substances et des fiches de criticité⁷⁷.
- Les travaux de l'Ifpen en matière de modélisation prospective de scénarios énergétiques incluant l'offre et la demande de métaux au niveau mondial, qui se sont concentrés sur les principaux métaux de la transition bas-carbone⁷⁸, dans le cadre notamment du projet Generate conduit par l'Ifpen et l'Institut de relations internationales et stratégiques (Iris)⁷⁹.
- La liste des matériaux critiques produite par l'USGS aux États-Unis qui a été publiée en 2018 et en 2022⁸⁰.
- L'étude britannique récente de criticité conduite par le *British Geological Survey*⁸¹.

À ces travaux s'ajoutent les nombreuses publications académiques ou de littérature grise sur le sujet, qui proposent des méthodes alternatives, la prise en compte de nouveaux facteurs (par exemple l'environnement) et couvrent non seulement des pays, mais aussi des entreprises, des produits ou des technologies⁸².

Les analyses de criticité ont plusieurs avantages en matière d'aide à la décision publique. Elles intègrent plusieurs dimensions pertinentes pour caractériser le risque d'approvisionnement : économiques, mais aussi géographiques, politiques, géopolitiques, institutionnelles (par exemple : qualité de la gouvernance), environnementales, etc. Elles constituent un outil de veille économique, prenant en compte les évolutions à la fois du côté de la demande et du côté de l'offre. Enfin, elles sont source de connaissance, car elles nécessitent d'acquérir, structurer et regrouper des données variées sur les chaînes d'approvisionnement.

Ces analyses de criticité ont cependant des limites. Les méthodes d'évaluation des risques sur l'offre s'avèrent très variables d'une étude à l'autre, d'un pays à l'autre, etc. (voir figure 13 pour une vision d'ensemble de la littérature et le *Policy Research Paper* de l'Ifpen et de l'Institut français des relations internationales (IFRI⁸³)). Dans le cas du cobalt par exemple, la moitié des études recensées conclut à une criticité forte, l'autre moitié à une criticité faible ou moyenne. Si une partie de cette variabilité résulte naturellement des différences de caractéristiques des pays, d'autres relèvent de choix méthodologiques propres, ce qui peut rendre les comparaisons entre études difficiles⁸⁴. Une autre limite est leur manque de dimension prospective : de nombreuses analyses de criticité sont effectuées sur la base des données actuelles, représentant ainsi une « photographie » de la situation. Or, les circonstances économiques, politiques et géopolitiques peuvent évoluer rapidement, et modifier ainsi le classement d'une substance. Un cas emblématique est celui du lithium, classé comme non critique par la Commission européenne jusqu'en 2017, et qui l'est devenu depuis cette date. Autre problème : il convient de différencier la criticité du mineraï de celle du métal ou de substance chimique importés, comme de celle des

⁷⁵ European Commission (2020), *Study on the EU's list of Critical Raw Materials*.

⁷⁶ Commission européenne (2023), *Matières premières critiques : garantir des chaînes d'approvisionnement sûres et durables pour l'avenir écologique et numérique de l'UE*.

⁷⁷ Voir Mineralinfo pour une liste à jour.

⁷⁸ Voir les synthèses sur le site de l'Ifpen (liens cliquables) : *aluminium, nickel, lithium, terres rares, cuivre, cobalt*.

⁷⁹ Le projet Generate a été conduit par l'Ifpen et l'Iris en suivant trois axes : la criticité des matériaux des technologies bas-carbone ; nouvelle géographie de la propriété intellectuelle des technologies bas-carbone ; évolution des modèles de développement et de diversification des pays producteurs d'hydrocarbures. Voir le site de l'Ifpen.

⁸⁰ USGS (2022), *Final List of Critical Minerals*.

⁸¹ Lusty, P., Shaw, R., Gunn, A. et Idoine, N., 2021, *UK criticality assessment of technology critical minerals and metals*, British Geological Survey Commissioned Report, CR/21/120. 76pp.

⁸² Schrijvers, D., Hool, A., Blengini, G. A., Chen, W. Q., Dewulf, J., Eggert, R., ... & Wäger, P. A. (2020). A review of methods and data to determine raw material criticality. *Resources, conservation and recycling*, 155, 104617.

⁸³ Bonnet, C., Carcanague, S., Hache, E., Seck, G.S., Simoën, M. (2019), *Vers une géopolitique de l'énergie plus complexe ?*, Policy Research Working Paper Ifpen-Iris,

⁸⁴ Ibid.

composants. En effet, si l'on se réfère dans l'économie nationale à la valeur ajoutée actuelle, cela peut conduire à minimiser le risque. Par exemple, l'Europe ne produisant pas ou peu certains composants à l'heure actuelle (par exemple : cellules photovoltaïques) la valeur ajoutée est faible alors que la transition écologique ne se fera pas sans panneaux photovoltaïques (importés ou non). Enfin, un des aspects les plus complexes à intégrer est celui du risque géopolitique, alors même qu'il pourrait croître de façon significative dans les années à venir. À l'heure actuelle, sa quantification passe par des indicateurs de gouvernance, tels que le *World Governance Index* de la Banque Mondiale. Cependant, comme le soulignent l'Ifrpen et l'Iris, les liens entre qualité de la gouvernance, stabilité du système politique et risques d'approvisionnements ne sont pas univoques, et entretiennent des dynamiques complexes impossibles à résumer dans un indicateur, quand bien même celui-ci résulterait de l'agrégation d'indicateurs plus fins⁸⁵.

Figure 13 : fréquence d'apparition des matériaux dans les évaluations de criticité et détermination de leur niveau de criticité



Note : élevée en rouge, moyenne en jaune ou faible en vert.

Source : Schrijvers et al., 2020⁸⁶

⁸⁵ Bonnet et al., (2019), op. cit.

⁸⁶ Schrijvers, D., Hool, A., Blengini, G. A., Chen, W. Q., Dewulf, J., Eggert, R., ... & Wäger, P. A. (2020). A review of methods and data to determine raw material criticality. Resources, conservation and recycling, 155, 104617.

2. PROJECTIONS ET PROSPECTIVES : EXPLORER LES FUTURS POSSIBLES POUR ÉLABORER DES STRATÉGIES À LONG TERME

D'autres approches permettent d'intégrer des horizons de plus long terme dans l'analyse de l'offre et de la demande en ressources minérales pour la transition bas-carbone. On distingue classiquement les projections et les prospectives. Les projections consistent à produire des scénarios chiffrés de futurs possibles, généralement à partir de modèles quantitatifs ou de relations statistiques établies empiriquement (par exemple : relation entre population et consommation alimentaire ; entre PIB et consommation d'énergie ; etc.). Les prospectives ont en commun avec les projections la construction de futurs possibles, mais considèrent un ensemble de variables généralement plus large, y compris des variables non quantifiables ou difficilement quantifiables : tendances sociétales, évolution des modes de vie, institutions, gouvernance, situation politique et géopolitique, etc. Elles prennent en compte à la fois des variables internes et des variables externes au système et s'attachent à caractériser leurs interactions dans le cadre de scénarios contrastés des futurs possibles.

Les travaux de projections et de prospectives du système énergétique ne datent pas d'hier : de nombreuses études ont été menées sur le sujet depuis le premier choc pétrolier de 1973 et des modèles quantitatifs intégrés ont été largement développés dans les années 1990-2000 (cf. Criqui et Waisman (2020) pour une vue d'ensemble). Ces modèles intégrés permettent de construire des scénarios de référence et de simuler différentes options de politique publique pour cadrer les stratégies énergétiques et climatiques à long terme, au niveau national ou international. Cependant, ils n'ont jusqu'à récemment que peu pris en compte les contraintes d'approvisionnement en ressources minérales. Un ensemble de travaux récents s'est penché sur le sujet et sont présentés ci-dessous.

a) Prospectives systémiques à l'échelle de la France : Transition(s) 2050 de l'Ademe et Futurs énergétiques 2050 de RTE

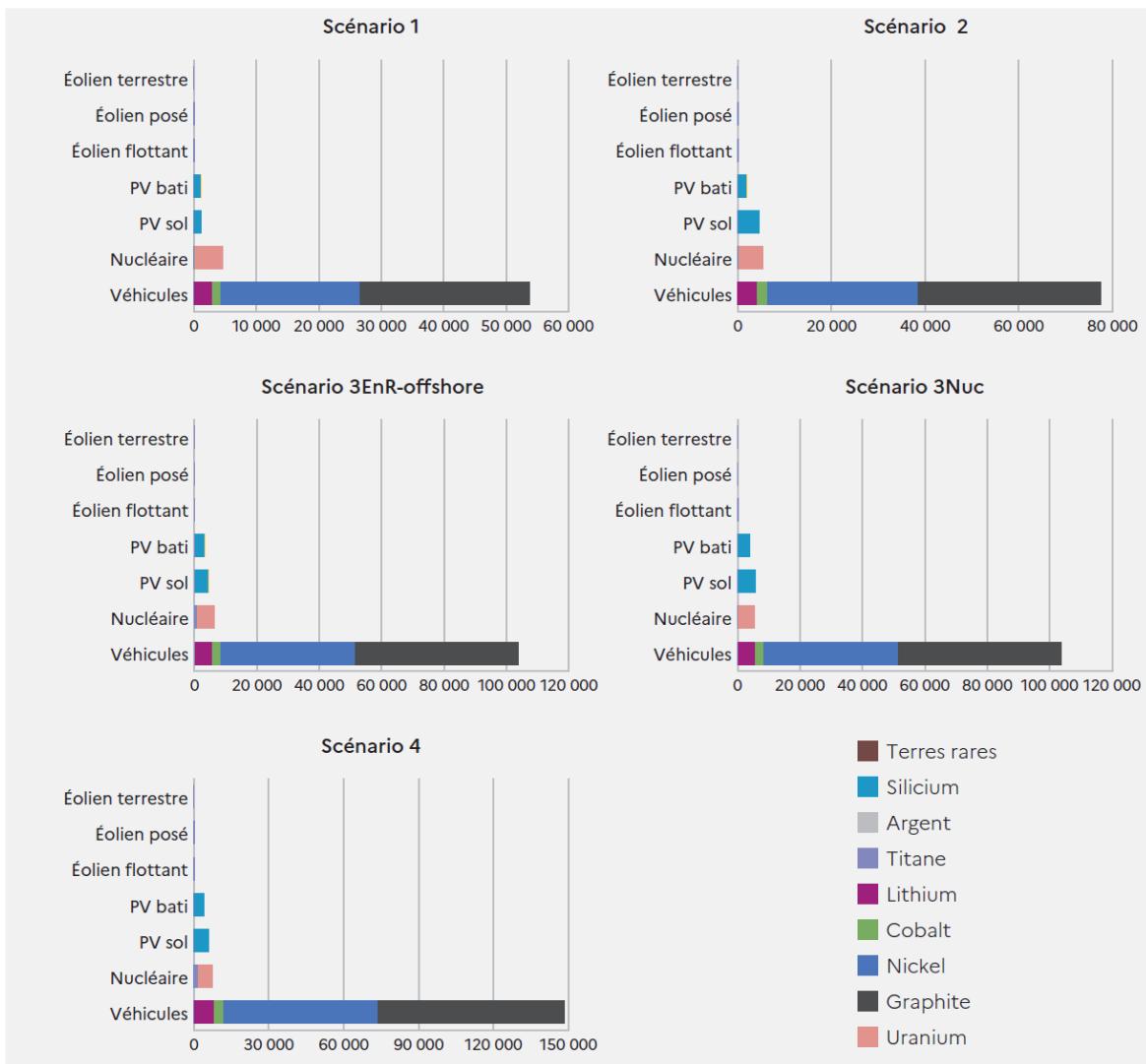
L'étude de l'Ademe *Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat* constitue un exemple récent de prospective exploratoire sur la question climatique incluant un volet ressources minérales des technologies bas-carbone. Quatre scénarios contrastés « zéro carbone » à l'horizon 2050 ont été construits en s'inspirant des scénarios du GIEC et d'autres exercices de prospectives, et enrichis par la consultation d'experts et d'acteurs : un scénario G1 « Génération frugale », dominé par la sobriété comme variable motrice ; un scénario G2 « Coopérations territoriales » fondé sur l'efficacité des ressources et une gouvernance plus ouverte ; un scénario G3 « Technologies vertes », qui met en priorité l'effort sur les technologies de décarbonation et un consumérisme vert ; un scénario G4 « Pari réparateur », qui conforte les tendances actuelles et ne les atténue très partiellement que par le captage de CO₂ dans l'air. Ces scénarios englobent un périmètre très large du système « France » incluant le système énergétique, l'agriculture et l'alimentation, l'industrie, l'aménagement, etc. Ils constituent chacun une image globale possible d'une France décarbonée.

Les quatre scénarios de la prospective de l'Ademe ont été quantifiés pour un certain nombre de variables : consommations énergétiques, déploiements des technologies bas-carbone, etc. Un volet spécial a été consacré aux besoins en matériaux et métaux dans chacun des scénarios, en considérant d'une part les grands matériaux et métaux (béton, acier, cuivre, aluminium, verre) d'autre part les « petits » matériaux et métaux (terres rares, silicium, lithium, cobalt, etc.). L'estimation des besoins en matériaux et métaux a été faite en partant des chiffres de déploiement des technologies – éolien terrestre, éolien en mer, photovoltaïque, etc. – et en leur attribuant un coefficient de « contenu unitaire » fondé sur les données disponibles dans la littérature⁸⁷. Ces besoins ont été estimés à l'état « brut », c'est-à-dire à technologie constante (pas d'hypothèse de progrès technologique) et en ne prenant pas en compte les possibilités de recyclage. Un des principaux résultats mis en exergue par l'Ademe est la très grande prédominance de la part des véhicules dans la hausse des besoins en « petits » métaux à l'horizon 2050, qui représentent plus de 90 % du total des besoins des technologies bas-carbone, pour l'essentiel le nickel, le graphite, le cobalt et le lithium, et ce, quel que soit le scénario considéré (figure 14).

⁸⁷ En particulier sur les données issues du projet Surfer : <https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/4654-surfer.html>.

Pour avoir une idée du degré possible de tension sur les approvisionnements futurs de ces différents matériaux et métaux, l'étude rapporte l'estimation des besoins de la France en 2050 à la production mondiale actuelle. L'analyse des résultats met en exergue trois métaux pouvant présenter, selon ce critère d'analyse, des enjeux d'approvisionnement : le lithium, dont les besoins pour la France en 2050 pourraient représenter entre 4 % (scénario sobriété) et 10 % (scénario pari réparateur) de la production mondiale de 2020 ; le cobalt et le cuivre, avec toutefois des ratios inférieurs à 2 % de la production mondiale (figure 15). Les besoins en terres rares en France ne représenteraient que 0,2 % de la production mondiale de 2020.

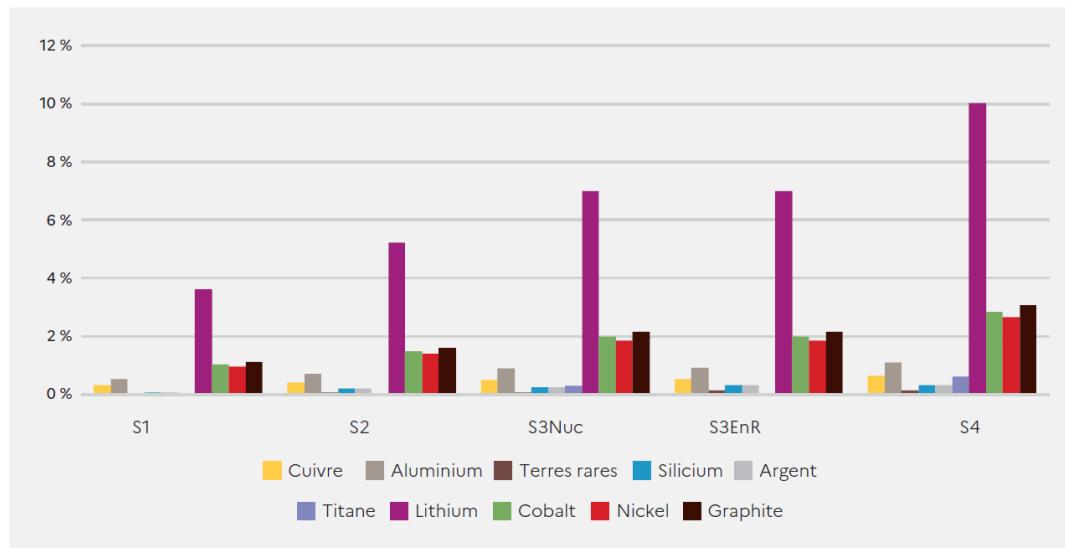
Figure 14 : besoins matières des petits matériaux et métaux moyens annuels pour les scénarios en tonnes/an



N.B. : échelle des abscisses différente d'un scénario à l'autre. Pour le nucléaire, les besoins « petits matériaux et métaux » présentés sur ce graphique sont à interpréter avec précaution : ils ne sont pas directement comparables avec ceux des autres filières dans ces graphiques car les périmètres considérés pour définir les intensités matières ne sont pas les mêmes, et les intensités matières utilisées sont celles du nucléaire historique. Cf. [section 4.4](#).

Source : Ademe, 2022

Figure 15 : besoins matières annuels moyens de la France entre 2020 et 2050 rapportés à la production mondiale 2020 pour 10 matériaux et métaux



Source : Ademe, 2022

Autre prospective à l'échelle de la France, l'étude de RTE *Futurs énergétiques de la France* se projette dans le système électrique français à l'horizon 2050⁸⁸. S'appuyant sur une concertation regroupant près de 120 organisations, elle propose six scénarios de mix de production et trois scénarios de consommation, intégrant différentes évolutions technologiques, économiques, sociales et environnementales. Dans le cadre de cet exercice, les besoins en métaux et minéraux nécessaires à la fabrication des équipements électriques (panneaux solaires, éoliennes, batteries, etc.) ont été également étudiés, et ont mis en exergue l'importance du cuivre, du lithium, et du cobalt afin de permettre le développement des énergies renouvelables, et propose des pistes pour mieux gérer cet enjeu.

b) L'étude Capgemini pour l'Institut national de l'économie circulaire : un premier chiffrage métal de la SNBC

Une étude publiée en 2022 propose également des éléments de chiffrage du volet « ressources minérales », en s'intéressant cette fois-ci aux utilisations induites par la stratégie nationale bas-carbone (SNBC)⁸⁹. Comme le soulignent les auteurs, cette intersection entre énergie, climat et carbone n'a été jusqu'ici que trop rarement considérée, alors même que les contraintes d'approvisionnement en ressources minérales constituent des variables déterminantes à prendre en compte pour proposer des scénarios « énergie-climat » crédibles à long terme, et faciliter leur réalisation par des mesures d'accompagnement dédiées aux ressources minérales dans une perspective d'économie circulaire.

Trois filières sont étudiées dans le cadre de ce travail : électrification et hydrogène (incluant notamment les véhicules électriques, l'éolien, le solaire et les réseaux) ; chaleur et biomasse ; construction. Pour ces différentes filières, les flux en ressources minérales ont été chiffrés, non seulement en volume mais également en valeur en utilisant les données de prix sur les marchés de métaux. Un indicateur original combinant criticité et flux en valeur monétaire a ainsi été construit (« euro.criticité »).

L'étude montre qu'il peut exister une grande différence sur les impacts matières des scénarios de décarbonation : dans le cas d'une décarbonation considérant peu la dimension économie circulaire, l'indicateur de criticité monétaire serait multiplié par 16 pour les métaux et minéraux. À l'inverse, la mise en place de mesures en faveur de l'économie circulaire permettrait de réduire cette dépendance, mesurée par le même indicateur, de 76 %, et de diviser par près de deux le

⁸⁸ RTE (2021), *Futurs énergétiques 2050 : les scénarios de mix de production à l'étude permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050*.

⁸⁹ Ledoux, E., Chardon, A., 2022, *Stratégie nationale bas-carbone sous contrainte de ressources – Une approche intégrée de la transition bas-carbone circulaire - Rapport final*. INEC, Capgemini Invent. 144 pages.

tonnage net des déchets. Les leviers simulés dans l'étude incluent : une maîtrise de la demande dans le cadre d'une politique de sobriété, une électrification plus faible (pompes à chaleur hybrides électricité gaz vert, hydrogène en priorité réservé aux usages industriels, etc.) et une meilleure utilisation de la biomasse.

Ces travaux de quantification en besoins matières des scénarios, outre les limites mentionnées précédemment, ne prennent pas en compte les effets de rétroaction des marchés des métaux, notamment les effets d'équilibre sur les prix, sur le déploiement des technologies bas-carbone.

c) Au niveau européen : une prospective qui combine analyse de tendances et étude de criticité

L'étude prospective du centre de ressources de la Commission européenne⁹⁰ s'appuie sur les visions du futur élaborées dans le cadre de la stratégie à long terme de l'Union européenne. Trois scénarios de décarbonation des systèmes énergétiques y sont développés : *Low Demand* (LDS), *Medium Demand* (MDS) et *High Demand Scenario* (HDS) qui se traduisent par des niveaux d'ambition croissante en matière de déploiement des technologies bas-carbone (nombre de véhicules électriques en circulation, puissance installée du parc éolien, des panneaux solaires, etc.). Par exemple, le parc européen de véhicules électriques à l'horizon 2050 est projeté à 140 millions dans le scénario LDS, contre 220 millions dans le scénario HDS.

Pour chacun des trois scénarios, les auteurs estiment les quantités totales de métaux critiques qui seront nécessaires pour couvrir les besoins des technologies bas-carbone correspondantes.

Une des forces de ce travail est de considérer un large ensemble de neuf technologies : batteries, piles à combustible, éolien, moteurs électriques, photovoltaïque, robotique, drones, impression 3D et technologies de l'information et de la communication. Ces technologies, et les besoins qui leur sont associés, se retrouvent dans trois grands secteurs qui en font un usage combiné : énergies renouvelables, mobilité et défense et aérospatial.

d) Les modèles mondiaux de prospective « énergie - ressources minérales » pour simuler des scénarios à l'horizon 2050

Plusieurs travaux de projections sur les systèmes énergétiques incluant les besoins en ressources minérales associées aux technologies bas-carbone ont été développés au cours de ces dernières années⁹¹. Selon Seck et al. (2020)⁹² on peut distinguer des grandes familles d'approches méthodologiques pour établir ces projections. Une première approche consiste à estimer les tendances actuelles, à faire des hypothèses d'évolution et à en tirer des estimations sur les consommations énergétiques et les besoins matières. Une deuxième approche consiste à utiliser les modèles de projections énergétiques à long terme, et d'en utiliser les sorties pour estimer les besoins matière associés, dans un esprit similaire aux travaux de l'Ademe *Transition(s) 2050*. Il s'agit d'un couplage « faible » dans le sens où il n'intègre pas de boucles de rétroactions entre le système « ressources minérales » et le système énergétique. Une troisième approche consiste à développer des modèles technico-économiques *bottom-up* des systèmes énergétiques, qui ne considèrent pas les besoins en métaux comme une résultante des scénarios, mais comme des contraintes internes, parfaitement intégrées au système « énergie-ressources minérales ». Cette dernière approche est par exemple celle suivie notamment par l'Ifpen, avec le modèle Tiam-Ifpen⁹³.

⁹⁰ JRC (2020), *Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study*.

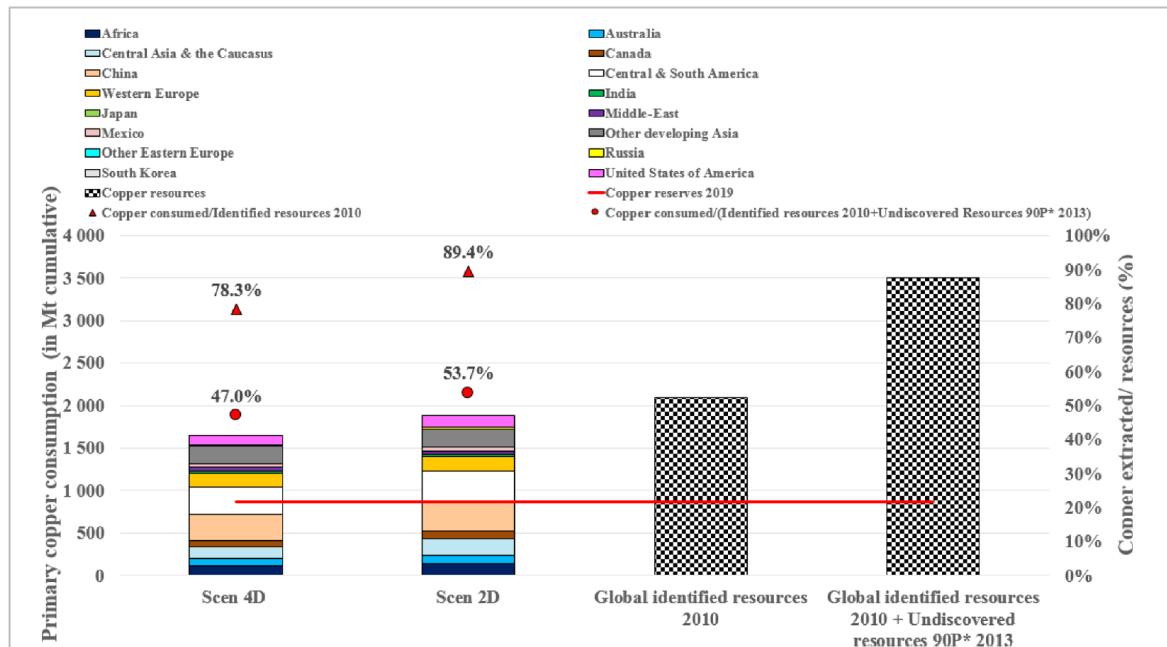
⁹¹ Boubault A, Maizi N., 2019, *Devising Mineral Resource Supply Pathways to a Low-Carbon Electricity Generation by 2100*, Resources, vol. 8, n° 1, p. 33, févr., doi: 10.3390/resources8010033

⁹² Seck, G. S., Hache, E., Bonnet, C., Simoën, M., & Carcanague, S. (2020). *Copper at the crossroads: Assessment of the interactions between low-carbon energy transition and supply limitations*. Resources, Conservation and Recycling, 163, 105072.

⁹³ Le modèle Tiam-Ifpen est un modèle mondial multirégional permettant d'évaluer les conséquences de différentes orientations énergétiques et environnementales avec une représentation détaillée des technologies et des types d'énergies. Dans le cadre du projet Generate, les chaînes de valeur de différents matériaux (cobalt, cuivre, lithium, nickel et terres rares) ont été intégrées dans le modèle pour évaluer leurs demandes sous les scénarios 2 °C et 4 °C en incluant des hypothèses sur les mobilités (soutenable et *business as usual*) et le recyclage.

Une série d'études prospectives fondées sur l'utilisation du modèle Tiam-Ifpen ont ainsi été publiées ces dernières années : sur les métaux nécessaires au transport⁹⁴, sur le cuivre⁹⁵ et le cobalt⁹⁶. Plus récemment, une modélisation intégrée suivant la même approche s'est intéressée à la décarbonation de l'hydrogène à l'horizon 2050⁹⁷. Ces travaux ont permis d'illustrer certains risques de « goulets d'étranglement » que font peser les ressources minérales de la transition bas-carbone. Pour le cuivre, par exemple, l'étude estime que dans un scénario de réchauffement à +2 °C, la consommation cumulée de cuivre atteindrait 1 900 millions de tonnes au niveau mondial en 2050, ce qui correspond à 89,4 % des ressources totales mondiales de cuivre identifiées en 2010, et plus du double des réserves connues en 2019 (figure 16).

Figure 16 : comparaison entre la production cumulée de cuivre primaire jusqu'en 2050 selon deux scénarios climatiques et le cuivre identifié et non découvert dans le monde en 2013



Source : Seck et al. (2020)

Employant la deuxième approche décrite ci-dessus, les travaux récents de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) constituent une référence incontournable. Depuis les années 1990, l'AIE construit des scénarios énergétiques mondiaux en utilisant le *World Energy Model*⁹⁸, un modèle offre-demande du système énergétique mondial⁹⁹. Les scénarios de l'AIE sont présentés et analysés dans le rapport-phare *Perspectives énergétiques mondiales (World Energy Outlook)*, publié tous les ans depuis 1998. Le modèle de l'AIE couvre actuellement les trajectoires énergétiques du monde, décomposé en 26 grandes régions avec, dans certains cas, des modélisations affinées à l'échelle nationale (12 pays côté demande, 102 pays pour l'offre de pétrole et de gaz, 19 pays pour l'offre de charbon).

⁹⁴ Hache, E., Seck, G. S., Simoen, M., Bonnet, C., & Carcanague, S. (2019). Critical raw materials and transportation sector electrification: A detailed bottom-up analysis in world transport. Applied Energy, 240, 6-25.

⁹⁵ Seck, G. S., Hache, E., Bonnet, C., Simoën, M., & Carcanague, S. (2020). Copper at the crossroads: Assessment of the interactions between low-carbon energy transition and supply limitations. Resources, Conservation and Recycling, 163, 105072.

⁹⁶ Seck, G. S., Hache, E., & Barnet, C. (2022). Potential bottleneck in the energy transition: The case of cobalt in an accelerating electro-mobility world. Resources Policy, 75, 102516.

⁹⁷ Seck, G. S., Hache, E., Sabathier, J., Guedes, F., Reigstad, G. A., Straus, J., ... & Cabot, C. (2022). Hydrogen and the decarbonization of the energy system in europe in 2050: A detailed model-based analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 167, 112779.

⁹⁸ Voir la page de l'AIE pour une description des principales caractéristiques du modèle.

⁹⁹ Ce modèle fait l'objet d'améliorations régulières pour améliorer ses capacités de simulations, la couverture des zones géographiques, etc.

Plus récemment, l'AIE s'est concentrée plus spécifiquement sur l'enjeu des ressources minérales nécessaires aux technologies bas-carbone, avec en particulier la publication d'un rapport spécial adossé au *World Energy Outlook de 2020 : The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*¹⁰⁰. Ce travail de prospective constitue une des principales références au niveau international sur le sujet. Il reprend les scénarios du *World Energy Outlook* et propose, pour chacun de ces scénarios, des estimations de la demande et de l'offre futurs en ressources minérales correspondants. Du côté de la demande, les estimations sont basées sur des taux de déploiement pour chacune des technologies bas-carbone, et des hypothèses sur l'évolution de l'intensité en ressources minérales de chaque technologie. Du côté de l'offre, le rapport se fonde sur les données disponibles sur les projets individuels dans les bases de données S&P Global (2021) et BloombergNEF (2020)¹⁰¹. Le rapport met notamment en lumière un écart important entre la demande et l'offre en matériaux pour la transition énergétique (cuivre, nickel, cobalt, lithium) à l'horizon 2050.

Ce travail a été récemment complété d'une prospective portant plus spécifiquement sur l'avenir des véhicules électriques, le *Global EV Outlook*, qui inclut un chapitre consacré aux chaînes d'approvisionnement en ressources minérales.

¹⁰⁰ Le rapport spécial, publié en 2020, a été mis à jour en mars 2022.

¹⁰¹ Plus précisément, le rapport indique : « Les estimations annuelles de la production minérale sont basées sur l'analyse des données de chaque projet fourni par S&P Global (2021) et BloombergNEF (2020), et complétées par des sources de données publiques ».

B. Hausse de la demande et usages concurrents

L'augmentation de la demande en ressources minérales résultera d'une combinaison de facteurs qu'il est important de bien décomposer pour analyser correctement les tendances à l'œuvre et interpréter le contenu des scénarios futurs des exercices de prospective. Ces facteurs de hausse de la demande en ressources minérales sont les suivants :

- La hausse de la demande en énergie associée à l'augmentation de la population mondiale et de sa consommation globale ;
- La part des différentes technologies bas-carbone mobilisées pour répondre à cette demande ;
- L'intensité matière de ces technologies bas-carbone et leur évolution dans le temps en fonction du progrès technologique ;
- La présence d'usages concurrents des ressources minérales et leurs évolutions futures ;
- Les politiques publiques susceptibles d'affecter à la fois l'offre et la demande en énergie et la part des différentes technologies bas-carbone (par exemple : respect des objectifs d'émissions de gaz à effet de serre de l'Accord de Paris ; politiques de soutien à l'efficacité énergétique ; politiques en faveur de la sobriété énergétique ; subventions de certaines technologies, etc.).

1. UNE DEMANDE ÉNERGÉTIQUE MONDIALE EN HAUSSE TENDANCIELLE, MAIS QUI DEVRA NÉCESSAIREMENT BAISSER POUR RESPECTER LES OBJECTIFS CLIMATIQUES

a) Scénarios de l'AIE

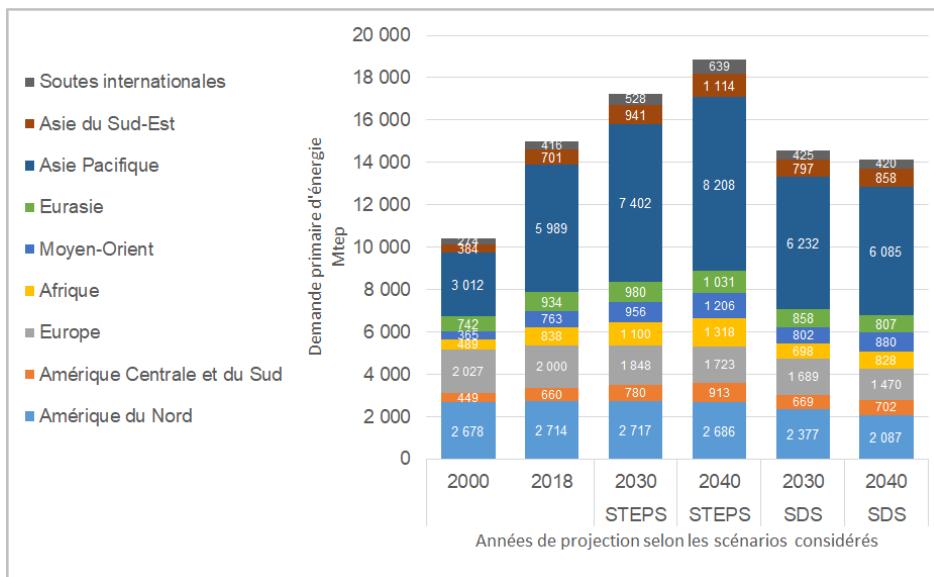
Les projections énergétiques mondiales de l'AIE distinguent deux grands types de scénarios :

- STEPS ou *Stated Policies Scenario* : il correspond aux politiques publiques mises en œuvre et aux mesures annoncées à ce jour - il s'agit donc d'un scénario tendanciel sans politiques additionnelles à celles déjà existantes ;
- SDS ou *Sustainable Development Scenario* : il correspond à l'objectif de ne pas dépasser une augmentation globale de la température de 1,7-1,8 °C, à atteindre avec une probabilité de 66 %, et d'atteindre la neutralité carbone en 2070. Il comprend des politiques additionnelles aux politiques déjà existantes, afin d'atteindre l'objectif mentionné.

Dans le scénario tendanciel (STEPS) prenant en compte les objectifs et les politiques annoncées, l'AIE table sur une poursuite de la hausse de la demande énergétique mondiale dans les deux décennies à venir (*figure 17*). Celle-ci passerait d'environ 15 000 Mtep en 2018 à plus de 18 000 Mtep en 2040, soit une augmentation de 20 % environ. L'évolution de la demande énergétique varie selon les régions du monde : elle est particulièrement en forte hausse en Asie et en Afrique, alors qu'elle est orientée légèrement à la baisse en Amérique du Nord et en Europe. L'amélioration de l'efficacité énergétique joue un rôle majeur dans l'endiguement de la demande énergétique, permettant de diviser par deux le rythme de la hausse de la demande énergétique générée par l'augmentation globale de la population mondiale.

Dans le scénario « développement durable » (SDS), l'amélioration de l'efficacité énergétique est poussée à son maximum, en combinaison avec des hypothèses plus ambitieuses de déploiement des technologies bas-carbone. Dans ce cas de figure, on assisterait dès 2030 à une baisse de la demande énergétique mondiale, qui se poursuit jusqu'en 2040. Cette baisse serait particulièrement marquée pour l'Amérique du Nord, qui passerait de 2 714 Mtep à 2 087 Mtep entre 2018 et 2040 ; ainsi qu'en Europe, qui passerait de 2 000 Mtep à 1 470 Mtep sur la même période (*figure 17*).

Figure 17 : scénarios énergétiques de l'AIE en 2030 et 2040



Source : graphique CGDD sur données issues de Cozzi, L. (2020), *Les perspectives énergétiques mondiales horizon 2040 - les scénarios de l'Agence internationale de l'énergie*, Futuribles n°438, septembre – octobre 2020

b) L'efficacité énergétique et les technologies bas-carbone seront-elles suffisantes ? La question de la sobriété

Outre l'efficacité énergétique, d'autres travaux de prospective misent sur la sobriété comme levier de réduction de la demande énergétique et comme moyen d'atteindre de façon plus sûre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'enjeu de la sobriété a été particulièrement mis en exergue en 2022, dans le contexte de la crise énergétique liée à la guerre en Ukraine. La sobriété est de plus en plus considérée par certains comme une condition nécessaire dans la conquête de la maîtrise de l'énergie. Il en est de même de la maîtrise des métaux stratégiques de la transition bas-carbone : si des actions ambitieuses sont nécessaires à toutes les étapes de la chaîne de l'offre de métaux stratégiques, une régulation parallèle de la demande en vue de la minimiser devrait constituer la première ligne d'un plan stratégique¹⁰².

Cette régulation de la demande devrait s'exercer à l'égard des entreprises, des particuliers et des administrations.

De manière générale, les entreprises méconnaissent les caractéristiques des métaux qui entrent dans la composition de leurs produits et n'en suivent pas la traçabilité en amont de leurs sous-traitants ; l'Ademe a la capacité, en collaboration avec les syndicats professionnels, de mettre en place des formations sectorielles pour diffuser la connaissance des enjeux métal et de leur consommation. Le passeport produit (européen et dédié aux batteries) va à cet égard contribuer à l'identification des matières dans les produits.

Les particuliers ont peu de connaissance sur les enjeux stratégiques, environnementaux et sociaux des métaux, et lorsqu'ils en ont, font rarement le lien avec les objets personnels qui en contiennent.

¹⁰² De même que la prévention est la priorité absolue en matière de déchets, avant tous les autres traitements possibles.

Dans ce cadre, plusieurs mesures peuvent être proposées :

- Réglementer (par exemple : standardisation des chargeurs de téléphones, ordinateurs, taxe au poids pour les voitures, etc.) ;
- Inciter (grâce à des subventions ciblées, encourager l'achat de petites voitures) ;
- Sensibiliser, encourager (labels, actions ONG, etc.) : utilisation prolongée des objets, choix de produits sans options inutiles, choix des produits les moins impactants (provenance, environnement, travail, etc.) ; mobiliser l'allongement de la durée de vie, déjà mise en place par la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire (AGEC), autour de la question des batteries, bien sûr dans le contexte de la mobilité électrique, mais aussi dans les objets connectés du quotidien, comme le téléphone mobile, l'ordinateur, le robot ménager, etc.

Enfin, concernant la demande des administrations, la délégation interministérielle aux métaux stratégiques (mise en place dans la continuité des conclusions du rapport Varin de janvier 2022), a, entre autres, comme objectif de sensibiliser les administrations publiques à la question de l'approvisionnement et de l'utilisation durable de métaux stratégiques, et pilotera l'élaboration de plans d'action par ministère et/ou par établissement public. Seront pionnières dans cet exercice les organisations dont le cœur de métiers demande un approvisionnement en ressources minérales important, comme le ministère des Armées ou RTE.

Cette régulation de la demande serait à compléter en parallèle par une réflexion sur la *low-tech*, moins dépendante des ressources minérales.

Publié en 2021 dans le cadre de la grande étude prospective *Transition(s) 2050* de l'Ademe, explorant quatre chemins pour atteindre la neutralité carbone en 2050, le premier des scénarios prospectifs baptisé « Génération frugale » repose sur une modification profonde des modes de vie et sur un appareil productif « en partie fondé sur les *low-tech* ». Le concept a émergé dans les années 1970, puis a été popularisé en 2014 par Philippe Bihouix dans l'ouvrage *L'âge des low-tech*¹⁰³. La définition donnée par l'Ademe est que la *low-tech* « s'applique à des démarches de conception et d'évolution de produits, de services, de procédés ou de systèmes qui visent à maximiser leur utilité sociale tout en maîtrisant leur impact environnemental, afin de ne pas excéder les limites planétaires ». Il s'agit à la fois de réduire la complexité technologique, d'entretenir l'existant plutôt que de le remplacer, de donner accès au plus grand nombre aux solutions et de maîtriser les usages. La *low-tech* n'est pas *no-tech*, elle peut à la fois bénéficier et susciter des innovations les plus à la pointe, et économiser de l'énergie et des ressources minérales lors de sa production¹⁰⁴.

À ce jour, la *low-tech* a surtout consisté à déployer des installations de petite taille, comme les éoliennes posées sur les toits des particuliers (éoliennes Pigott, ou celles de la start-up lilloise Unéole, qui fabrique des mini-éoliennes ultra bas-carbone).

Dans le domaine de la production de chaleur, les technologies du solaire thermique et de la cogénération solaire sont peu utilisatrices de ressources minérales et offrent de bons rendements.

Le solaire thermique, conversion du rayonnement solaire en énergie calorifique, peut chauffer de l'eau jusqu'à 60 °C grâce à de simples capteurs, ou de la vapeur jusqu'à 250 °C par des systèmes à concentration. La chaleur produite sera utilisée en eau chaude sanitaire ou en eau technique pour alimenter un procédé vapeur ou de séchage. Sont concernées les applications à basse et moyenne température dans le secteur du bâtiment, des réseaux de chaleur et de l'industrie. Les applications haute température sont quasi-exclusivement réservées au secteur de l'électricité et de l'industrie. La France compte deux des plus grands fabricants de panneaux solaires thermiques, et 30 % de l'énergie finale consommée dans l'industrie française pour des températures de moins de 200°C pourraient provenir d'un système solaire thermique.

La cogénération solaire fournit, à travers le panneau solaire hybride, à la fois de la production de chaleur et de la production d'électricité. Sur la face supérieure des panneaux, côté soleil, des cellules photovoltaïques transforment la lumière solaire (les ultra-violets) en électricité. Sur la face inférieure, des capteurs solaires thermiques capturent la chaleur (les infra-rouges) émise par le soleil, et, grâce à un fluide caloporteur, la transportent jusqu'à un ballon de stockage. Et si cette

¹⁰³ Bihouix, P., 2014, *L'âge des low-tech. Vers une civilisation techniquement soutenable*, Collection Anthropocène, Ed. Seuil.

¹⁰⁴ L'étude de l'Ademe *État des lieux et perspectives des low-tech*, 2021, résume les problématiques et les avancées dans le domaine.

chaleur est en partie utilisée pour refroidir les cellules photovoltaïques en cas de fortes chaleurs, leur rendement augmente d'environ 13 %.

Sans avoir l'ambition de rivaliser avec les installations de grande taille, la *low-tech* s'inscrit dans une position intermédiaire entre le micro et la macro, que l'on peut qualifier de « méso ».

La *low-tech* présente également des opportunités dans le domaine de la mobilité, avec les véhicules motorisés légers, le possible retour du trolleybus, ou les navires à voiles modernisées (encadré 4).

Encadré 4 : quelques exemples de la nouvelle *low-tech* appliquée à la mobilité

Des véhicules motorisés légers et peu gourmands en ressources

En avril 2022, l'Ademe s'est associée avec d'autres partenaires pour lancer l'eXtrême Défi, un challenge ouvert de trois ans pour créer une catégorie de véhicules sobres et efficaces, peu coûteux, interopérables, simples à assembler à l'aide de composants standards et recyclables. Un des projets est celui de la Gazelle, une petite voiture électrique qui sera fabriquée en France dans des micro-usines mobiles : 180 km d'autonomie, 40 % de réduction de la consommation d'énergie, avec une consommation électrique qui serait de 6 kWh pour 100 km.

Le trolleybus : frugalité énergétique et qualité de l'air

Le trolleybus est apparu dans les années 1900, et actuellement, environ 315 réseaux fonctionnent dans 45 pays différents. Parfois appelé « métrobus » ou « tramway sur pneus » c'est un véhicule électrique sur pneumatiques, alimenté par des lignes aériennes, et qui permet le transport en commun de voyageurs en zone urbaine, il circule de façon compatible avec la desserte automobile. À la différence des bus électriques qui fonctionnent à partir de batteries ou de piles à combustible, le courant est fourni par une double caténaire, ce qui permet un retour du courant par l'une d'entre elles. En effet, lorsqu'il redescend d'une pente, le trolleybus freine en mode récupération, ce qui économise ses freins mécaniques et génère de l'électricité qui est renvoyée sur la ligne et va alimenter d'autres trolleybus en circulation. Le trolleybus est silencieux, non polluant, sa durée de vie moyenne est de l'ordre de 25 ans, soit le double de celle d'un autobus. La propulsion électrique le rend apte à gravir de très fortes pentes, d'où son emploi dans des villes pentues comme Marseille, Lyon ou Lausanne.

Les navires à voile, avenir du commerce maritime ?

90 % des échanges de marchandises dans le monde sont aujourd'hui réalisés par le transport maritime, qui représente 7 % de la consommation mondiale de pétrole, 3 % des émissions mondiales de GES, soit l'équivalent du transport aérien, et 15 % des émissions du secteur des transports. Cependant, d'ici 2050 les échanges pourraient être multipliés par 6 et passer à 17 % des émissions totales de GES. L'objectif de l'Organisation maritime internationale (OMI) est de réduire de 50 % d'ici 2050 les émissions de GES du secteur par rapport à 2008. Pour ce faire, l'OMI envisage de recourir à des carburants moins polluants que le fuel lourd, de diminuer les teneurs en soufre des carburants utilisés ; d'utiliser le numérique pour améliorer le routage des navires, d'abaisser la vitesse des navires et d'électrifier les ports.

Depuis quelques années, émerge une autre voie de transport maritime bas-carbone : la propulsion vélique, ou éolienne, car il s'agit d'utiliser l'énergie de l'effort du vent sur la voile pour faire avancer le bateau. C'est le mode de navigation utilisé depuis plus de 5 000 ans, les premiers bateaux à vapeur apparaissant au XVIII^e siècle et s'étant plus largement développé au XIX^e siècle, précédant les navires au charbon, puis au fuel lourd. Il est aujourd'hui au centre de projets émanant aussi bien de start-up, principalement françaises, ou d'entreprises établies, comme Airbus, Ariane, ou les Chantiers de l'Atlantique. Par exemple :

- Yves Parlier, ancien vainqueur de la Route du Rhum, a développé en 2007 une aile géante semblable à celle d'un parafoil, installable sur n'importe quel bateau, et qui se déploie à 500 mètres dans les airs, pour aller chercher les vents forts. Avec un vent arrière, cette aile peut tirer un cargo jusqu'à 10 ou 20 fois plus qu'une voile classique, à surface égale. L'aile prend le relais du moteur, en partie ou en totalité, économisant 20 à 40 % de l'énergie dépensée pendant le voyage.

- En 2016, la start-up Airseas, filiale d'Airbus, a développé une solution similaire : Seawing, une aile utilisée sur les navires de l'avionneur transportant des éléments de l'A380 entre Bordeaux et Bristol. Depuis, une autre aile, de 500 m², est testée sur le bateau qui achemine les pièces détachées des avions d'Airbus de Saint-Nazaire à la ville de Mobile aux États-Unis. Airseas a également signé un accord avec l'armateur japonais propriétaire de la 5^e flotte mondiale, pour équiper d'une voile de 1 000 m² 50 cargos transportant des marchandises en vrac entre le Japon et l'Australie.
- Le projet « Grain de Sail », un cargo tout en aluminium pour être léger, solide et recyclable, long de 24 m et large de 6 m, de 520 m² de voile au portant. Il effectue des voyages transatlantiques, pendant lesquels il emporte du vin biologique français et rapporte du cacao et du café vert.

Des projets *high-tech* se développent également, avec des voiles rigides, repliables, en matériaux composites, qui ont tout leur intérêt, mais dont le bilan matières n'est pas comparable à celui des initiatives *low-tech*. Enfin, on peut également citer l'exemple des dirigeables pour le transport des charges lourdes. En France, la PME Flying Whales a levé en 2022 des fonds à hauteur de 122 millions d'euros, avec en outre une participation de l'État à travers le fonds French Tech Souveraineté de Bpifrance.

Depuis quelques années, l'Ademe a constitué un écosystème autour de la *low-tech* : associations, chercheurs, designers, entreprises de toutes tailles, institutions publiques. Des initiatives ont déjà vu le jour grâce à l'engagement de directions régionales et une étude sur l'état des lieux et perspectives des *low-tech* a été publiée fin 2021, accompagnée de fiches sectorielles.

Une des limitations majeures du levier « efficacité énergétique » est le risque d'effet-rebond, phénomène déjà décrit par l'économiste britannique William S. Jevons au XIX^e siècle, et qui décrit le fait qu'une partie des gains d'efficacité énergétique des machines (automobiles, train, etc.) incite les individus à davantage utiliser ces machines, ce qui induit *in fine* une hausse de la consommation énergétique (augmentation des trajets en automobile, par exemple)¹⁰⁵. Ce point de vue est toutefois nuancé par certaines analyses de l'AIE¹⁰⁶ : l'effet-rebond n'a historiquement pas empêché un réel découplage relatif entre la croissance du PIB et la consommation énergétique dans les pays développés ; alors que dans les pays en développement, le problème prioritaire n'est pas l'effet-rebond mais surtout le manque d'accès à l'énergie et en particulier à l'électricité, véritable frein au développement et à la lutte contre la pauvreté. En effet, malgré de réels progrès sur la dernière décennie, il n'en reste pas moins qu'en 2019, 759 millions de personnes restaient privées d'accès à l'électricité, dont 570 millions en Afrique subsaharienne. Ceci est un enjeu majeur pour l'atteinte l'objectif de développement durable (ODD) d'un « accès universel à une énergie propre à un coût abordable »¹⁰⁷.

Enfin, pour certains experts, va se poser la question de la « double sobriété » énergétique et minérale. En effet, il pourrait exister un risque qu'une sobriété uniquement centrée sur la consommation énergétique ou les émissions de gaz à effet de serre, ne déplace le problème vers un accroissement, potentiellement non durable, de l'extraction de ressources minérales qui sont également finies et non renouvelables en dehors, bien sûr, des capacités de recyclage. Ceci suggère qu'une sobriété globale serait nécessaire à la transition énergétique, incluant un volet « sobriété des métaux » en tant que tel, et sur lequel le consommateur-citoyen, voire l'entreprise, ne sont pas encore suffisamment sensibilisés, ni informés¹⁰⁸.

¹⁰⁵ Pour citer Jevons : « L'idée selon laquelle un usage plus économique du combustible équivaudrait à une moindre consommation est une confusion totale. C'est l'exact contraire qui est vrai. (...) tout ce qui conduit à augmenter l'efficacité du charbon et à diminuer le coût de son usage, a directement tendance à augmenter la valeur du moteur à vapeur et à élargir le champ de son utilisation ». Source : Jevons, W.S., 1865, *The Coal Question*, Ed. Macmillan & Co. Londres.

¹⁰⁶ Lane, K., Mayer, A., 2018, *Efficiency should always be the first answer*, site internet de l'Agence internationale de l'énergie (consulté le 26/09/2022).

¹⁰⁷ Hache, E. (2022), *Géopolitique des énergies, tensions d'un monde en mutation : 40 fiches illustrées pour comprendre le monde*, Collection Géopolitique dirigée par Pascal Boniface, Ed. Eyrolles.

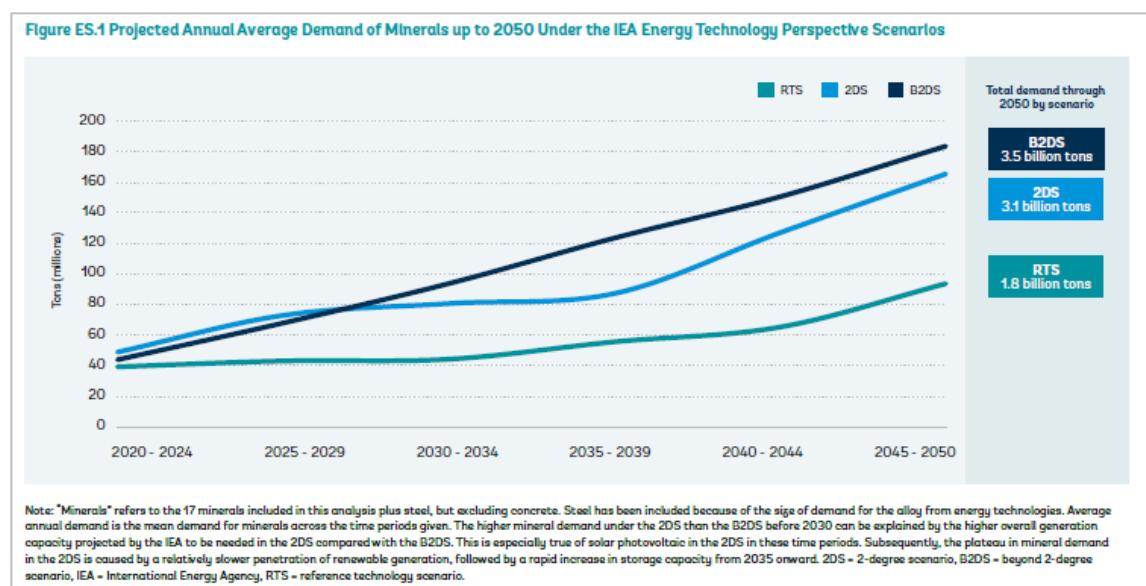
¹⁰⁸ Hache, E., Barnet, C., Seck, G.S., 2020, *Sobriété : à quand un Yuka pour comparer les matériaux dans nos produits ?*, The Conversation.

2. DES BESOINS EN RESSOURCES MINÉRALES EN FORTE HAUSSE POUR ASSURER LA TRANSITION BAS-CARBONE

Comme nous avons pu le voir en début de partie, plusieurs études ont cherché à quantifier ces augmentations pour chaque minéral et pour chaque famille de technologies. Ces approches quantitatives permettent d'évaluer les besoins en métaux dans des scénarios de développement des technologies bas-carbone et de les comparer aux besoins des autres filières.

Les travaux montrent d'abord que la consommation de ressources minérales va fortement augmenter dans le cadre de la transition bas-carbone. Cette augmentation va d'abord être quantitative, comme le montre la *figure 18*, qui présente la demande croissante pour 17 métaux dans plusieurs scénarios, les scénarios à plus forte croissance induisant une demande plus forte en métaux.

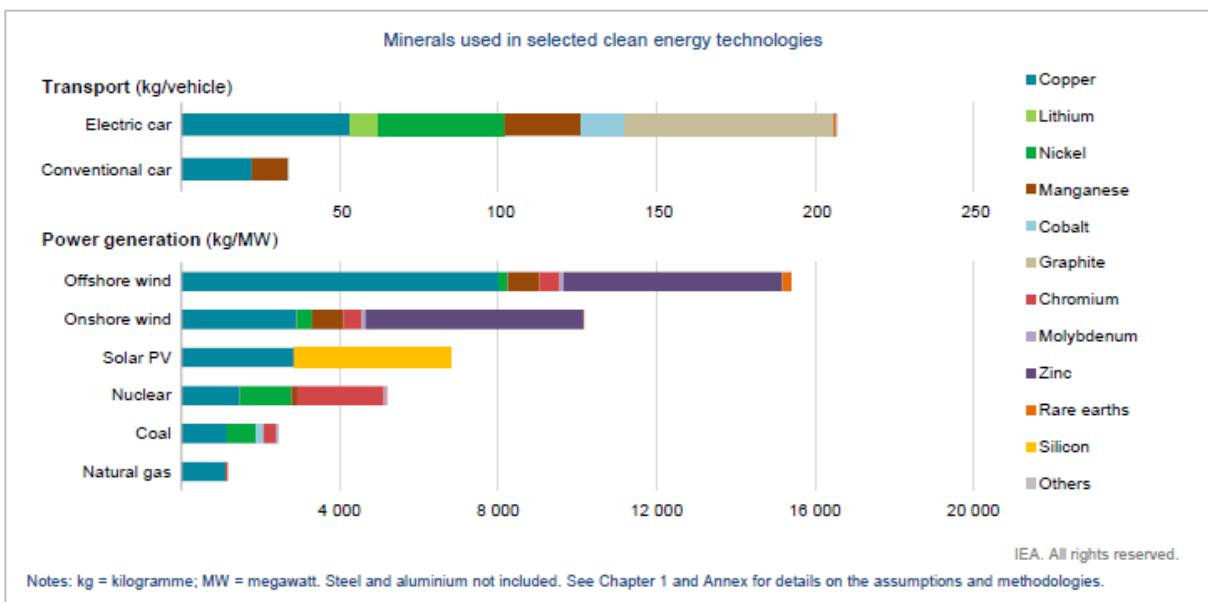
Figure 18 : projection de la demande mondiale en ressources minérales dans les principaux scénarios de la transition bas-carbone



Sources : AIE 2020 ; World Bank 2020

Mais cette augmentation de la demande sera également qualitative, d'une part par la diversité des métaux nécessaires à la transition bas-carbone, et d'autre part par le niveau de pureté des métaux utilisés. Comme le montre la *figure 19*, les technologies de la transition bas-carbone (voiture électrique, éolien, solaire photovoltaïque) sont ainsi plus intensives en métaux technologiques que leurs alternatives conventionnelles. C'est notamment le cas de la voiture électrique donné ici en exemple, qui nécessite des ressources minérales telles que le lithium ou le graphite, qui ne sont pas utilisés dans les véhicules à motorisation thermique.

Figure 19 : comparaison des intensités en certains métaux technologiques de plusieurs familles de technologies de transport et de production d'énergie



Source : AIE 2020

La mobilité électrique est le facteur le plus important de la demande en métaux de la transition énergétique. Elle représente en effet 50 à 60 % de l'augmentation de la demande globale, devant les réseaux électriques et le photovoltaïque (35 à 45 %), les autres technologies ne comptant que pour 5 %¹⁰⁹. Cette pression sur les ressources induites par les réseaux a notamment été soulignée par les travaux de Watari *et al.* (2019)¹¹⁰, qui ont travaillé sur les scénarios de l'AIE et ont montré l'importance du fer, du cuivre et du nickel pour le développement des réseaux, du photovoltaïque et des véhicules électriques.

Cependant, un autre risque, impossible à quantifier de la sorte, est celui de l'émergence de nouveaux usages concurrents pour les métaux. De tels nouveaux usages, potentiellement à plus forte valeur ajoutée, pourraient ainsi être prioritaires et réduire la disponibilité en métaux pour les familles de technologies de la transition bas-carbone. Ce risque peut aussi exister au sein même de la famille des technologies bas-carbone, entre véhicules électriques et EnR.

a) Le photovoltaïque

Comme exposé sur la figure 20, l'AIE table à l'horizon 2030 sur une hausse relativement limitée de la demande pour l'argent et le silicium de qualité solaire dans le scénario correspondant aux politiques publiques déjà annoncées. De plus la concentration en argent dans les panneaux photovoltaïques est en baisse tendancielle en raison du coût important de ce métal. Il est ainsi possible d'évaluer que la demande en argent pour le solaire photovoltaïque va rester stable entre 10 et 15 % de la demande mondiale totale d'argent¹¹¹.

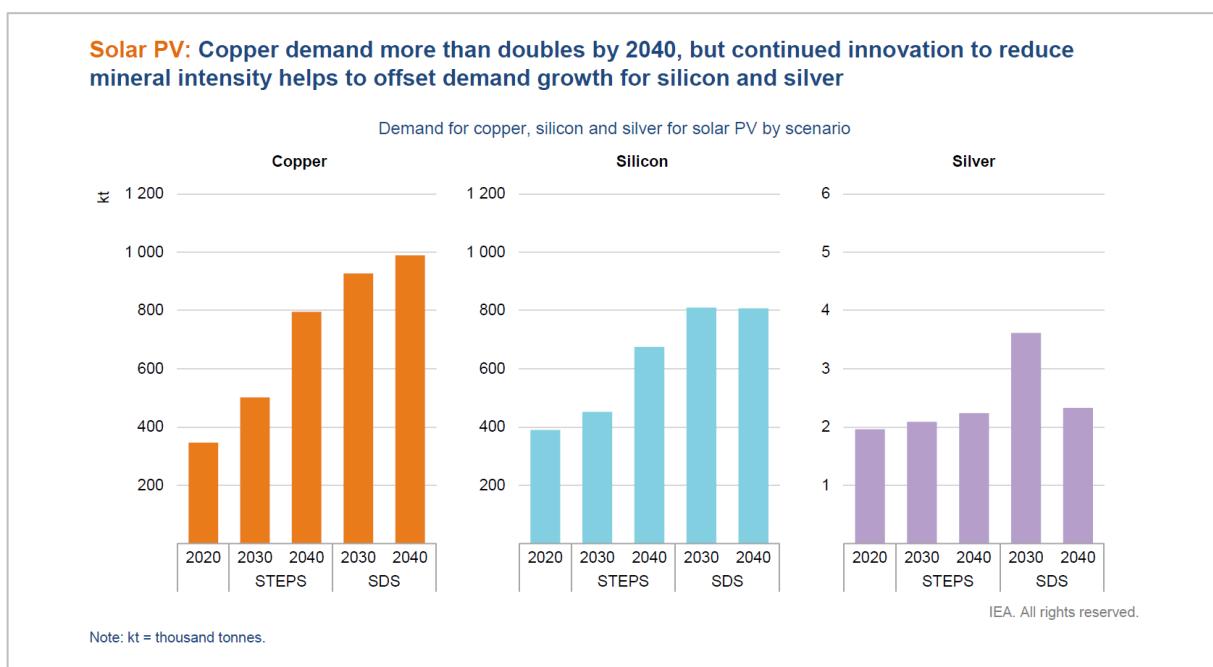
En ce qui concerne le silicium, près de 20 % de la production métallurgique est déjà destinée aux cellules photovoltaïques. À intensité constante, la part du solaire dans la demande de silicium métal devrait rester à moins de 30 % du total de la demande mondiale à l'horizon 2030, surtout si les autres filières utilisatrices que sont les alliages d'aluminium et les silicones continuent leurs fortes croissances. Néanmoins, des tensions sont possibles en raison des étapes de transformation intermédiaires pour atteindre les hautes puretés requises pour les cellules photovoltaïques et la microélectronique, notamment les technologies monocristallines. Enfin, l'émergence de nouvelles technologies de cellules, notamment à base de pérovskites, possiblement à partir de 2030, pourrait modifier les besoins en matières premières de la filière du solaire photovoltaïque.

¹⁰⁹ Metals for Clean Energy, Pathways to solving Europe's raw materials challenge, Université de Louvain pour Eurométaux, avril 2022.

¹¹⁰ Takuma Watari, Benjamin C. McLellan, Damien Giurco, Elsa Dominish, Eiji Yamasue, Keisuke Nansai (2019), Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity, Resources, Conservation and Recycling, Volume 148, Pages 91-103, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.015>.

¹¹¹ Pour plus d'informations sur les usages et la production de l'argent, consulter la fiche criticité de l'argent.

Figure 20 : croissance de la demande mondiale pour le cuivre, le silicium et l'argent destinés au photovoltaïque selon les scénarios considérés

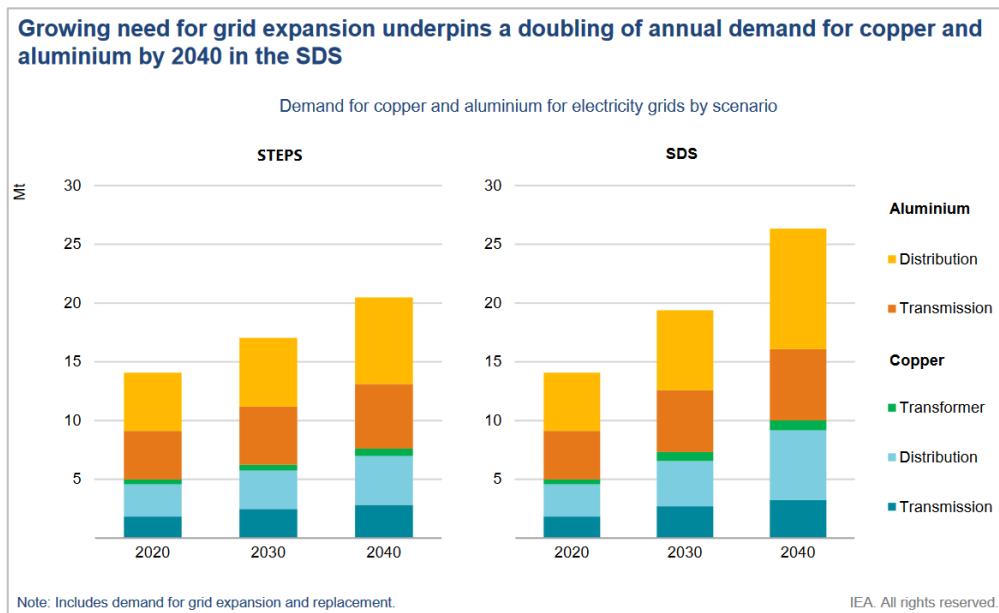


Source : AIE, 2020, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*

b) Les réseaux électriques et l'hydrogène

Les principaux métaux utilisés dans les réseaux électriques étudiés dans le cadre des présents travaux sont le cuivre et l'aluminium pour les câbles et postes électriques. Leur consommation va augmenter, comme le montre la figure 21 dans les différents scénarios de l'AIE. Cette hausse s'explique principalement par le volume de nouvelles installations et de rénovations des réseaux électriques, car ces technologies sont matures et leurs intensités matières sont stables, même si cuivre et aluminium sont partiellement substituables. La transition bas-carbone engendre notamment un besoin de nouvelles lignes électriques, tant pour la distribution que pour le transport de l'électricité pour deux raisons. D'une part, la production d'électricité décarbonée par des énergies renouvelables se fait par des sources diffuses sur le territoire, ce qui nécessite un maillage plus fin afin de collecter l'électricité produite. D'autre part, les besoins de flexibilité des réseaux électriques pour intégrer l'intermittence et la variabilité de la production et de la demande nécessitent le renforcement des interconnexions entre les différentes régions, tant à l'échelle nationale qu'à l'échelle européenne.

Figure 21 : croissance de la demande en cuivre et aluminium pour les réseaux électriques au niveau mondial selon différents scénarios



Source : AIE, 2020, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*

Les réseaux électriques et l'électronique représentent environ un tiers de l'usage total du cuivre, le solde étant réparti entre les infrastructures, l'industrie et le transport.

En ce qui concerne les métaux technologiques utilisés dans l'électronique (gallium, germanium, tantale), les données de marché sont incomplètes et ne permettent pas de déterminer leur demande directement liée à la transition bas-carbone. Néanmoins, la diffusion croissante du numérique dans les systèmes énergétiques (*smart-grids*, voiture électrique, onduleurs pour installations de production énergies renouvelables, etc.) impliquera probablement une forte hausse de l'utilisation de ces métaux. De plus, l'analyse conduite dans le rapport du plan ressources sur les réseaux¹¹² indique une importante vulnérabilité d'approvisionnement pour les composants électroniques de base, en raison d'une dépendance vis-à-vis de l'Asie, et de la Chine en particulier¹¹³.

Globalement, les métaux étudiés pour leur utilisation dans les piles à combustibles et électrolyseurs, comme le titane et les platinoïdes, verront leur demande augmenter selon la vitesse de déploiement de ces technologies qui sont pour le moment en phase d'industrialisation. La demande de ces métaux, qui dépend principalement d'autres marchés (pigments, aéronautique et défense, joaillerie, etc.) devrait donc être peu impactée à court terme. Pour les platinoïdes, l'éventuelle croissance de la demande pour certaines technologies de l'hydrogène devrait de plus être compensée par la réduction de la demande pour d'autres usages, notamment les pots catalytiques.

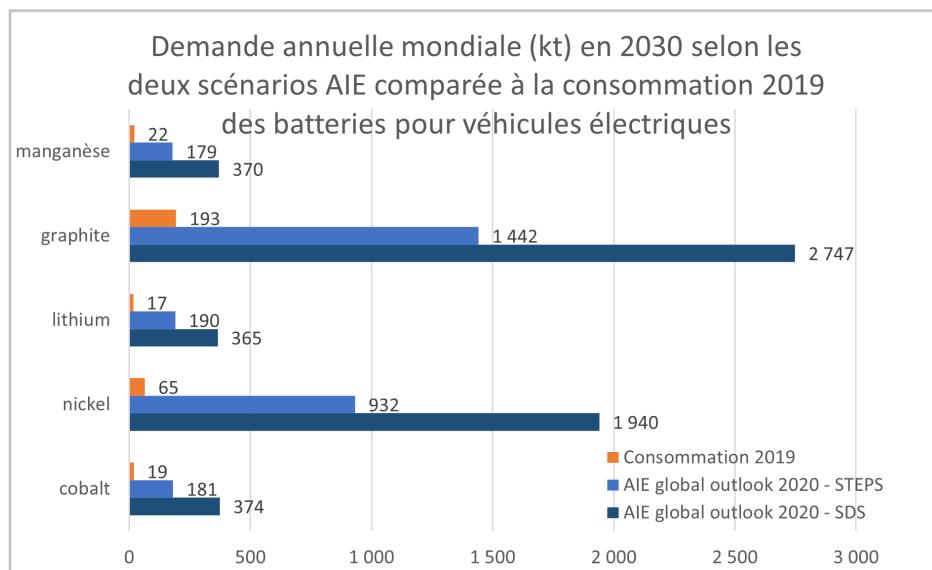
¹¹² CGDD, 2020, *Les réseaux électriques - lignes électriques, stockage stationnaire et réseaux intelligents : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles*.

¹¹³ Ceci peut par ailleurs poser la question des priorités intersectorielles entre des usages aussi variés que les *smart grids*, l'Internet des objets, la domotique intelligente, etc.

c) Les batteries lithium-ion

Les besoins matières pour l'électrification de la mobilité vont fortement augmenter au cours des prochaines années. Comme le montre la figure 22, la demande en manganèse, graphite, lithium, nickel et cobalt va fortement augmenter durant la décennie 2020-2030.

Figure 22 : comparaison de la demande annuelle des besoins matières pour la flotte de véhicule électrique en 2030 avec la consommation actuelle (2019)



Sources : AIE ; BRGM ; CEA pour le graphite, CGDD rapport n°3

L'AIE prévoit ainsi une multiplication par au moins 10 des consommations de lithium, cobalt et nickel pour les batteries d'ici à 2030, et une augmentation d'un facteur au moins 7 pour le graphite et le manganèse. Ces hausses de consommation sont largement expliquées par le déploiement rapide des véhicules électriques à batteries, puisque l'AIE prévoit que quinze fois plus de véhicules électriques seront vendus en 2030 qu'en 2019. Les batteries lithium-ion dites NMC (nickel-manganèse-cobalt) sont largement majoritaires, mais une alternative existe à travers les batteries LFP (lithium-fer-phosphate), qui permettent de s'affranchir des besoins en nickel, cobalt et manganèse (mais pas en lithium ni graphite), en contrepartie de performances légèrement inférieures. De plus, la tendance actuelle est de limiter la quantité de nickel et de cobalt dans les batteries NMC de nouvelles générations, et de doper les électrodes en graphite au silicium.

Néanmoins, ces évolutions ne suffiront pas à limiter la hausse de la demande en matériaux pour batteries, en raison de la croissance exponentielle du marché du véhicule électrique et de l'augmentation tendancielle de la taille et de la puissance des batteries embarquées.

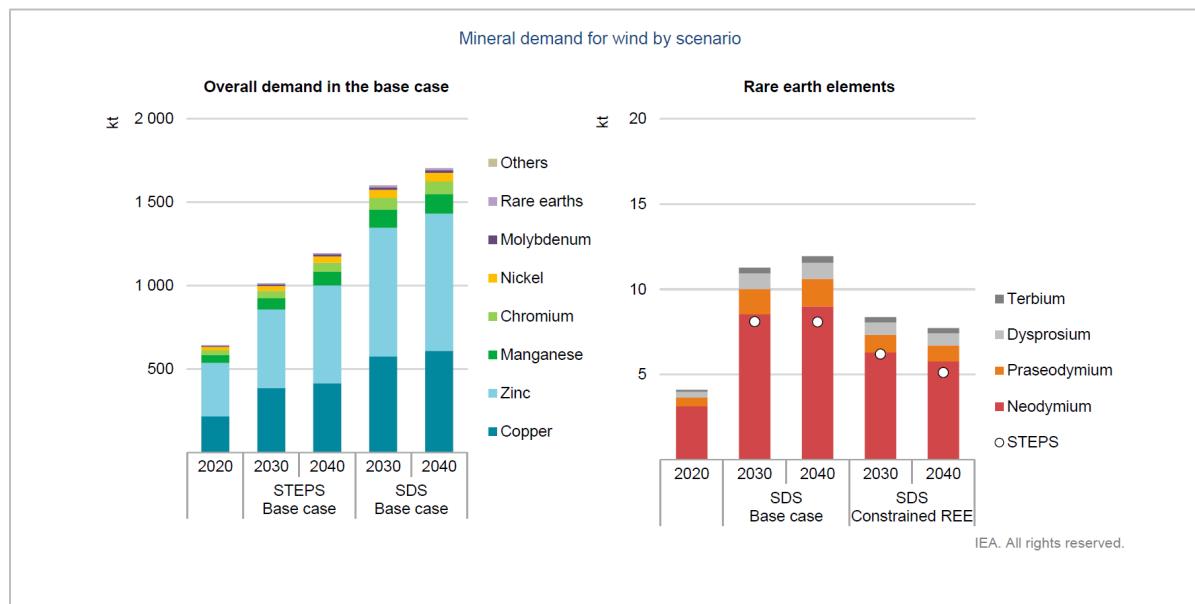
Les batteries Li-ion constituent déjà le principal usage du lithium et du cobalt (plus de 60 % en 2019, voir rapport n°3). La forte croissance de la demande aura donc un fort impact sur les marchés de ces métaux.

Pour le nickel, le manganèse et le graphite, d'autres usages resteront majoritaires par rapport à la production de batteries Li-ion, notamment les alliages d'acier. Néanmoins, des qualités spécifiques de ces matériaux sont nécessaires aux batteries Li-ion, respectivement le sulfate de nickel (issu de nickel raffiné de classe I), les dioxydes et sulfates de manganèse et les graphites sphériques. C'est pour ces sous-variétés de matériaux que la demande augmentera le plus sensiblement.

d) Éolien et moteurs électriques

L'éolien présente un impact matière significatif, tout comme le solaire photovoltaïque. La forte croissance de l'éolien, de plus de 10 % par an des turbines installées dans le monde explique l'augmentation importante de la demande en métaux pour l'éolien.

Figure 23 : évolution de la demande en ressources minérales pour l'éolien selon les scénarios



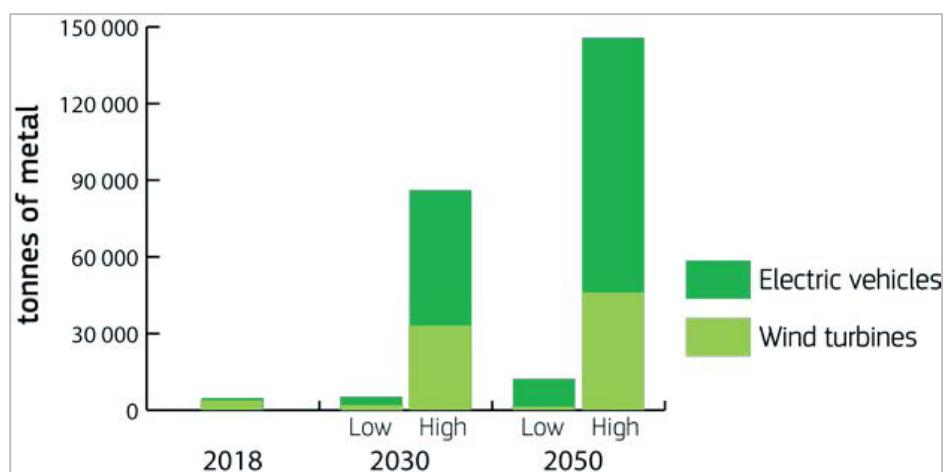
Source : AIE, 2020, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*

Parmi les métaux dont la consommation va croître, certains comme le nickel, le chrome, le manganèse et le zinc sont utilisés dans les alliages d'aciers nécessaires aux nacelles, mâts et fondations. Ces utilisations n'ont pas été étudiées spécifiquement dans le cadre du plan ressources, mais des résultats tirés d'autres études sont présentés dans le rapport n°4 et la figure 23.

En revanche, le cuivre et les terres rares magnétiques (néodyme, praséodyme, dysprosium et terbium qui constituent environ un tiers de la masse des aimants permanents) sont utilisés en quantités importantes dans les génératrices éoliennes offshore et pour les moteurs électriques et ont fait l'objet du rapport n°4. Le cuivre est par ailleurs utilisé dans les installations électriques et le raccordement au réseau électrique.

Néanmoins, la demande d'aimants permanents à terres rares pour l'éolien ne constitue que 10 % de la demande totale, principalement pour l'éolien en mer. La demande provenant des moteurs électriques, nécessaires notamment à la mobilité bas-carbone, représente 25 % de la demande totale. La croissance du marché du véhicule électrique étant par ailleurs plus forte que celle de l'éolien, la demande en terres rares sera largement tirée par les moteurs électriques, comme montré par la figure 24.

Figure 24 : demande mondiale en terres rares pour aimants permanents à destination des technologies bas-carbone



Source : JRC, 2020

Il convient de noter que les aimants permanents à terres rares peuvent être substitués, tant dans les génératrices éoliennes que dans les moteurs électriques, par des systèmes utilisant de plus grandes quantités de cuivre. Ces alternatives technologiques présentent néanmoins des inconvénients, comme l'augmentation de la complexité et de la masse du système¹¹⁴, une légère baisse de rendement, ainsi que le recours accru au cuivre qui est par ailleurs fortement sollicité par de nombreux secteurs.

¹¹⁴ Voir rapport n° 4 pour plus de détails.

POINTS ESSENTIELS

- La transition bas-carbone n'aura pas les mêmes impacts sur la demande de chacun des métaux et minéraux étudiés. De plus, certaines matières sont substituables, ou bien l'intensité de leur utilisation peut être réduite. Par ailleurs, l'usage majoritaire de certains minéraux par des secteurs autres que la transition énergétique peut contraindre l'ensemble du marché.
- L'impact de la transition bas-carbone sera généralement limité sur la demande à l'horizon 2030 en béton, silicium, aluminium, graphite, titane, manganèse, argent et platinoïdes. Leur demande va croître, mais ce sont les métaux de batteries et les terres rares qui vont connaître la plus forte augmentation. Néanmoins certaines qualités ou certains alliages de ces métaux pourraient être plus fortement sollicités et engendrer des tensions à moyen terme.
- L'augmentation de la demande sera la plus forte pour les métaux et minéraux de batteries (en particulier lithium, nickel, cobalt, graphite et manganèse), dont la consommation pourrait être pour certains multipliée par 10 en 2030 par rapport à 2019. La demande en lithium et cobalt sera principalement destinée au marché des batteries. La demande en nickel et manganèse pour les batteries semble faible par rapport aux quantités totales extraites annuellement de ces minéraux, mais les formes de nickel (sulfates de nickel de classe I) et manganèse (dioxyde de manganèse) sont plus spécifiques et qualitatives que les qualités sidérurgiques.
- La demande en terres rares utilisées dans les aimants permanents (néodyme, praséodyme, dysprosium et terbium) pour la mobilité électrique et l'éolien offshore va également fortement croître, et les seules possibilités de substitution nécessitent d'importantes quantités de cuivre, tout en présentant des inconvénients techniques.
- Enfin, il est difficile de quantifier l'augmentation de la demande en cuivre pour la transition bas-carbone, puisque chacune des technologies en consomme, cependant il est avéré que cette demande augmente fortement dans tous les cas.
- Un dernier risque, impossible à quantifier, est celui de l'apparition, en dehors de la transition énergétique, de nouvelles applications à forte valeur ajoutée pour les métaux technologiques. Si cette nouvelle demande était prioritaire par rapport aux technologies bas-carbone, elle pourrait mettre en danger leurs approvisionnements et nécessiter des mesures appropriées pour assurer la priorité de la transition bas-carbone.

C. Risques techniques relatifs à l'offre : géologie, développement minier et recyclage

Si l'augmentation de la demande présente d'importants risques, l'absence de substituts et plusieurs facteurs techniques peuvent limiter la disponibilité des quantités nécessaires des ressources minérales.

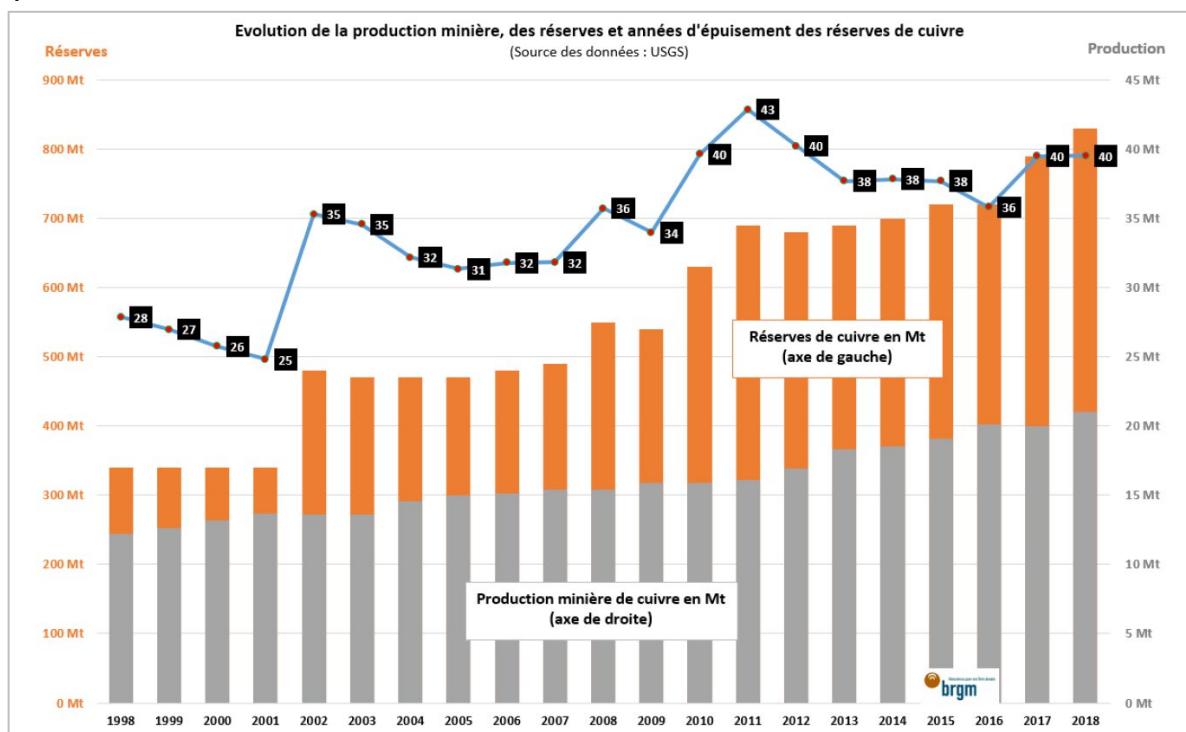
1. LA DISPONIBILITÉ GÉOLOGIQUE ET LES COPRODUITS

Un indicateur fréquemment utilisé pour évaluer la disponibilité géologique est celui du nombre d'années d'épuisement théorique des réserves, qui est calculé en divisant les réserves¹¹⁵ par la production annuelle pour une année donnée.

Cette comparaison de la production aux réserves permet de constater que pour de nombreuses matières étudiées, peu de risques de pénurie géologique existent. C'est notamment le cas pour le sable, pour le béton, la bauxite pour l'aluminium, le silicium, les platinoides, l'argent, le titane, le lithium, le graphite (qui peut de plus être synthétisé à partir de précurseurs carbonés), les terres rares, le nickel et le manganèse.

Cependant, cet indicateur est trompeur car les réserves minérales sont susceptibles d'évoluer à la hausse ou à la baisse en fonction de nombreux paramètres économiques, techniques et réglementaires. Ceci est illustré notamment dans le cas du cuivre, pour lequel le nombre d'années d'épuisement théorique est relativement stable, à environ quarante ans comme montré sur la figure 25, puisque si la production de cuivre a fortement augmenté au cours des dernières décennies, de nouvelles réserves et ressources ont été identifiées.

Figure 25 : évolution de la production minière, des réserves et années d'épuisement théorique pour le cuivre



Sources : BRGM ; Comes

¹¹⁵ Les réserves se distinguent des ressources minérales par le fait qu'elles ont été identifiées précisément et sont considérées comme économiquement exploitables. L'estimation des réserves se fait sur la base de critères économiques (cours des métaux, taux de change, etc.), de contraintes commerciales et environnementales mais aussi des techniques d'exploitation et de traitement.

Néanmoins, comme mentionné dans la partie I.A, les découvertes de nouveaux gisements de hautes teneurs et contenant d'importantes ressources deviennent moins fréquentes. De plus, selon plusieurs sources comme le Comes, peu d'investissements dans de nouvelles mines et capacités de raffinage ont été réalisés au cours de la fin de la décennie 2010, ce qui rend possible des tensions sur l'offre de cuivre à partir de 2025. Seule une analyse dynamique de l'offre et de la demande en matières minérales peut donc permettre de présager de probables pénuries.

Encadré 5 : décroissance de la teneur moyenne des gisements : vers la fin des gisements à haute teneur ?

La littérature, qu'elle soit académique ou journalistique, se fait l'écho d'une baisse constante de la teneur moyenne des gisements de différents minerais métalliques exploités. Par exemple la teneur moyenne exploitée des gisements de cuivre est actuellement de l'ordre d'environ 1 %, tandis que les anciens mineurs, exploitaient avec 3 à 4 % de teneur moyenne au XX^e siècle, voire 15 % au XIX^e siècle.

Les différents auteurs en concluent souvent que la baisse de ces teneurs indique que les meilleurs gisements ont été découverts et que les nouveaux gisements vont baisser en qualité. Mais le meilleur est-il vraiment derrière nous ? La baisse des teneurs moyennes des gisements passés et de ceux en exploitation est un fait industriel non contestable, mais sa lecture nécessite de comprendre comment est établie cette teneur. Il ne s'agit pas d'un paramètre physique et géologique absolu comme on pourrait le penser mais d'une donnée technico-économique calculée.

La teneur moyenne d'un gisement, c'est-à-dire la teneur de ce qui sera réellement exploité, résulte du choix que fait l'opérateur minier d'exploiter ou pas certaines zones. Aujourd'hui, de gros volumes sont nécessaires pour satisfaire la demande et les seules parties riches des gisements, comme en 1950 et avant, n'auraient pas été en mesure de satisfaire la demande actuelle. Les opérateurs miniers exploitent donc des teneurs de plus en plus faibles des mêmes gisements, permettant ainsi d'accéder à des gros volumes. Ceci est rendu possible par l'énergie mobilisable, les améliorations technologiques et l'augmentation de la productivité.

C'est ici qu'intervient la notion fondamentale de « teneur de coupure », le *cut-off* des publications minières anglo-saxonnes. Cette teneur de coupure résulte d'un calcul économique qui définit la teneur en métal en dessous de laquelle les coûts d'extraction et de traitement sont supérieurs à la valeur de référence, et donc en dessous de laquelle l'exploitation du minerai ne sera pas réalisée.

La valeur de la teneur de coupure résulte de plusieurs facteurs :

- La nature métallogénique du gisement ;
- La méthode d'exploitation ; ainsi un même gisement, s'il est exploité à ciel ouvert, pourra avoir une teneur de coupure quatre fois plus faible que s'il est exploité en souterrain ;
- La valorisation croissante de métaux mineurs dans les sous-produits conduit à rentabiliser des plus faibles teneurs du métal principal ;
- Le cours des métaux ;
- Le choix de l'opérateur minier dans la rémunération de son actionnariat.

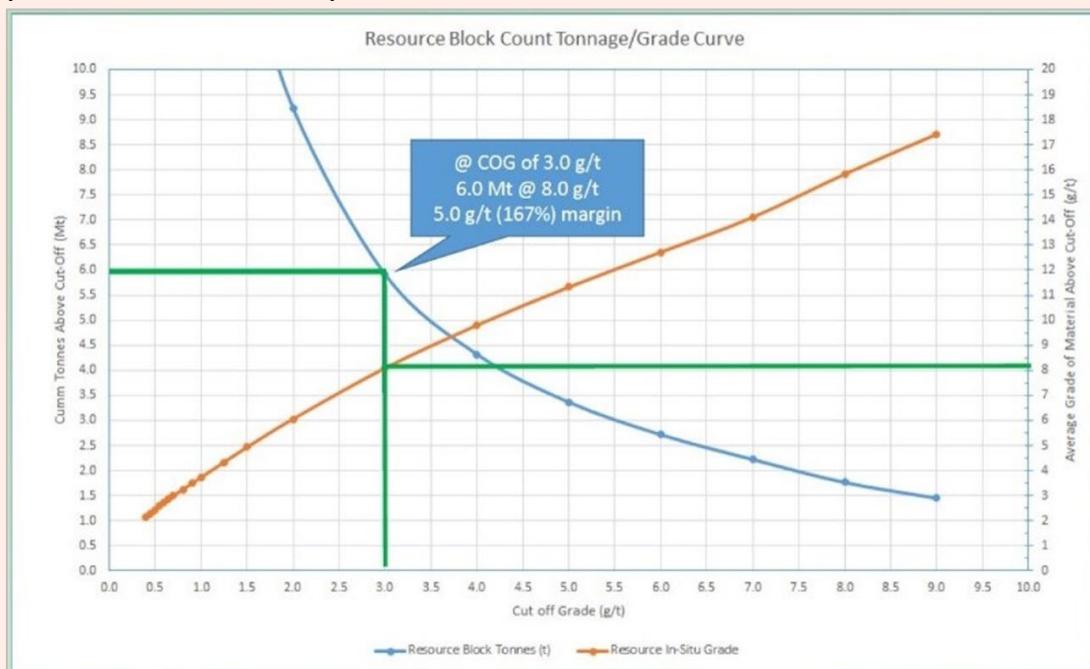
Ainsi du fait de ces choix industriels, il convient d'avoir à l'esprit que la teneur de coupure peut varier d'une année à l'autre pour un même gisement, comme le montre la lecture des rapports des compagnies minières comme Glencore. La teneur de coupure est fondamentale dans l'analyse d'un gisement, elle influe tant sur la teneur moyenne que sur les réserves et ressources de celui-ci. En effet, comme le montre la figure 26 ci-dessous, la teneur moyenne augmente linéairement dans le même sens que la teneur de coupure, tandis que les ressources diminuent dans le sens inverse. Une teneur de coupure plus faible augmente de façon exponentielle les tonnages de minerai et diminue la teneur moyenne. L'augmentation de la teneur de coupure a exactement l'effet inverse. Il en résulte qu'il est légitime de s'interroger sur la réelle signification de la diminution observée des teneurs moyennes des gisements.

Il ne semble pas exister de travaux qui corrigent la teneur moyenne par la teneur de coupure. Les données sont compliquées à trouver car elles nécessitent d'avoir accès aux rapports annuels détaillés de chaque gisement. La teneur moyenne est une donnée économique et pas une donnée naturaliste, elle devrait continuer de baisser, notamment si le cours des métaux et la demande augmentent. L'évolution de la teneur moyenne des gisements ne peut pas être

attribuée, sur la base des données disponibles, à la baisse structurelle de la qualité des gisements mais reflète plutôt l'évolution de l'activité minière. De nouveaux gisements comportant des zones à hautes teneurs seront découverts mais la teneur moyenne de chacun baissera par le fait de la dilution des hautes teneurs dans plus de volumes à plus faible teneur.

Il est à noter qu'un accès de plus en plus difficile à l'énergie, notamment causé par des hausses de prix, constituerait un obstacle à l'exploitation de gisements de plus basses teneurs, augmentant ainsi la teneur de coupure.

Figure 26 : évolution de la teneur moyenne d'un gisement et des tonnages de ressources en fonction de la teneur de coupure retenue



Source : Brian W. Buss

Sources :

- [1] Mudd, G M 2009, *The sustainability of Mining in Australia : Key Production Trends and Their Environmental Implications for the Future*. Research Report N°RR5, Département of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute, Revised – April 2009.
- [2] Evolution Mining Mineral resource and ore reserve statement – December 2021 Update 30 June 2022.
- [3] Rötzer and Schmidt Decreasing Metal Ore Grades – Is the Fear of Resource Depletion Justified ? Resources 2018, 7, 88.
- [4] AMC Consultants Break-even is Broken: Learn How to Align Your Break-even Grades With Company Goals.
- [5] Glencore Resources & Reserves as at 31 December 2021.
- [6] Brian W. Buss Understanding Cut-Off Grade 4 (Tonnage, Grade, and Costs) or "Why is my mine losing money?" 2018.
- [7] West James Decreasing Metal Ore Grades: Are They Really Being Driven by the Depletion of High-Grade Deposits ? Journal of Industrial Ecology ; Volume 15, Issue 2, April 2011.

De plus, le caractère de coproduit de certains métaux implique que leur extraction peut être conditionnée à la production d'autres minéraux.

Les coproduits qui apparaissent ainsi les plus à risque d'un point de vue de la disponibilité sont typiquement des métaux technologiques, dont les marchés sont caractérisés par de faibles volumes (au contraire des métaux de base et industriels) et par des prix relativement faibles (au contraire des métaux précieux, comme l'argent, les platinoïdes et l'or), comme le cobalt et le gallium¹¹⁶. À une échelle plus fine, au niveau des mines, l'analyse de ces dépendances est guidée par les caractéristiques des gisements ainsi que les revenus que procure chaque substance : en général le cobalt est un coproduit du cuivre et du nickel, mais rarement l'inverse.

¹¹⁶ Pour exemple d'étude de la coproduction de métaux pour le solaire photovoltaïque, voir notamment Florian Fizaine, *By product production of minor metals : Threat or opportunity for the development of clean technologies ? The PV sector as an illustration* (2013).

2. LE TEMPS DE DÉVELOPPEMENT ET LES RISQUES DES NOUVEAUX PROJETS

Des réserves suffisantes peuvent ne pas suffire à satisfaire la demande, notamment en raison du temps de développement nécessaire à leur exploitation. Ce type de risque concerne particulièrement le lithium, dont l'extraction à grande échelle est relativement récente et à destination principale de la transition bas-carbone.

Potentiellement tous les métaux sont concernés par ce temps de développement, qui nécessite une prise en compte dans les politiques publiques, d'autant que plusieurs facteurs laissent penser que le temps de développement des projets miniers va augmenter. Comme mentionné dans la partie I.A, les gisements de hautes teneurs proches de la surface sont déjà exploités. L'exploration nécessite donc de rechercher des gisements plus profonds, à plus faibles teneurs et dont la durée et le coût d'exploration vont croître. La taille et la qualité des gisements apparaissent également comme des déterminants du temps de développement d'un projet minier¹¹⁷. L'intensification de la contestation sociale et des risques environnementaux contribuerait aussi à l'augmentation du temps nécessaire à la mise en production de nouvelles mines, voire même à leur absence de mise en production ou à des échelles réduites (cf. partie II. E sur les risques environnementaux et sociaux).

Globalement, les gisements de moindre qualité (plus difficilement accessibles, plus faibles teneurs) entraînent une hausse de la consommation d'énergie, pour toutes les étapes de l'extraction et de la minéralurgie. Mais l'augmentation la plus forte concerne l'extraction, comme montré sur la figure 27 (courbe verte).

Figure 27 : évolution de la consommation d'énergie de différentes étapes de la production de métaux

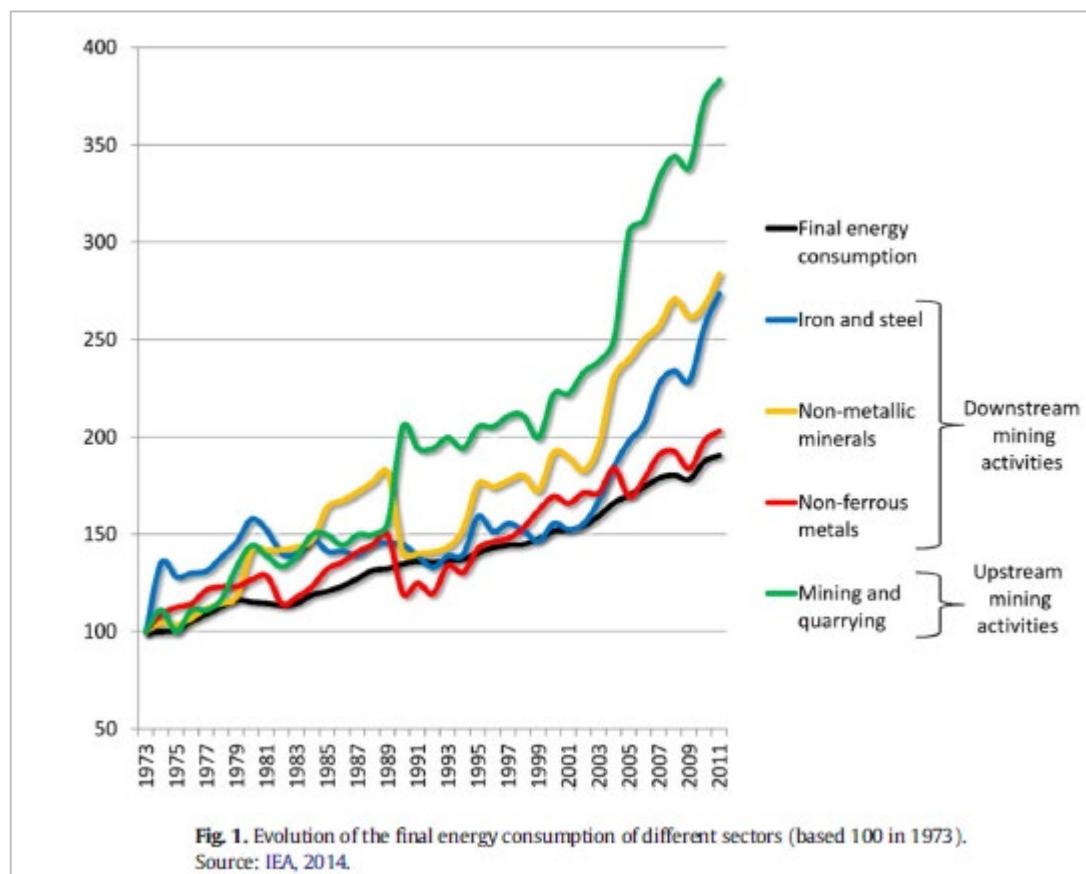


Fig. 1. Evolution of the final energy consumption of different sectors (based 100 in 1973).
Source: IEA, 2014.

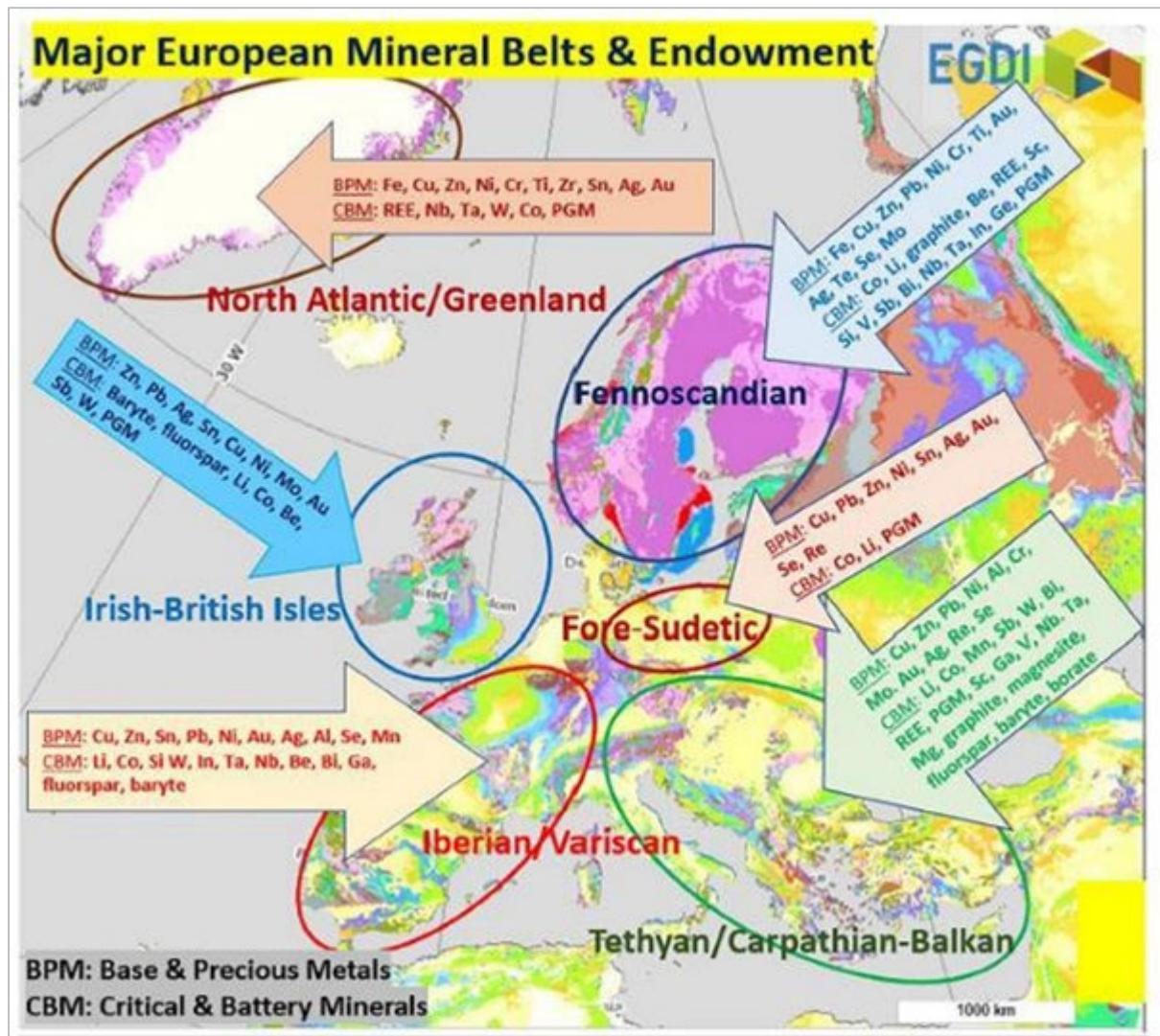
Source : Fizaine, Court, 2015

¹¹⁷ Pour le cas du cuivre et de l'or, voir notamment le WPS7823, Kan, Nguyen, Ohnsorge, Schodde (2016).

Les nouveaux projets sont donc confrontés au risque de la disponibilité d'énergie en quantité suffisante et à un coût permettant une exploitation rentable. De plus, la « rentabilité énergétique » de l'exploitation minière risque d'être mise à mal, et de dégrader la rentabilité énergétique des filières technologiques¹¹⁸.

Le sous-sol européen recèle des gisements potentiels, comme le montre la figure 28, qui pourraient être exploités au cours des prochaines décennies.

Figure 28 : principaux bassins minéraux européens, métaux de base et métaux critiques présents (sans préjuger de leur exploitabilité)



Source : Manuel Regueiro & Antonio Alonso-Jimenez, 2021. "Minerals in the future of Europe," Mineral Economics, Springer; Raw Materials Group (RMG); Luleå University of Technology, vol. 34(2), pages 209-224

¹¹⁸ L'EROI d'une filière peut être amélioré par le recours au recyclage, dont la consommation énergétique est moindre que celle de l'extraction primaire.

Enfin, à partir des années 2030-2035, les ressources minérales des fonds marins pourraient devenir exploitables. La France possède le deuxième espace maritime mondial et prépare le lancement de missions de cartographie et d'exploration des grands fonds marins dans le cadre de l'objectif « grands fonds marins » de France 2030¹¹⁹. Si certains pays se projettent dans l'exploitation de ces ressources à court terme (dès 2024 pour la république de Nauru et 2028 pour la Belgique et le Japon), la plupart des nations travaillent à une meilleure connaissance de ces objets géologiques et de leur environnement et à la démonstration de la faisabilité technico-économique et environnementale d'éventuels projets d'exploitation. Le président de la République française a annoncé le 30 juin 2022, lors de la 2^e conférence des Nations unies sur l'océan, qu'il faut « mettre en place un cadre réglementaire pour mettre un terme à l'exploitation minière en haute mer et interdire toute nouvelle activité dangereuse pour les écosystèmes océaniques ». Du côté des acteurs privés, on note également le positionnement de certains constructeurs, comme Volkswagen, en oppositions aux mines sous-marines avec l'exclusion de tout matériau provenant de cette méthode.

Trois types de gisements sous-marins sont étudiés. Les encroûtements cobaltifères apparaissent comme des cibles d'intérêt car ils recouvrent d'importantes superficies (1,7 % de la surface des océans selon l'Ifremer¹²⁰). Certains sont situés à des profondeurs relativement faibles (à partir de 400 m) par rapport aux autres gisements des grands fonds. Ces encroûtements sont principalement composés d'oxydes de fer et de manganèse, mais peuvent présenter des teneurs en cobalt et en platine plus de trois fois supérieures aux gisements terrestres (sur certains sites polynésiens). Parmi les obstacles à l'exploitation, figurent le manque de connaissance des fonds sous-marins, l'incertitude quant aux procédés à utiliser puisque les épaisseurs des encroûtements varient entre 2 et 20 cm et le risque économique lié à la volatilité du marché du cobalt.

D'autres gisements sont les sulfures hydrothermaux, situés autour des *black smokers* dont l'activité hydrothermale concentre des métaux sous forme d'amas sulfurés entre 800 et 4 100 m de profondeur. Ces amas sont de tailles et compositions très variables mais souvent concentrés en cuivre, zinc (et leurs coproduits), argent et or. Plusieurs projets pilotes ont été menés pour l'exploration et l'exploitation de ces amas¹²¹, mais aucun projet à échelle industrielle n'est connu pour le moment. L'exploitation de ces gisements présentera d'importants risques sur le plan environnemental.

Les nodules polymétalliques, qui reposent sur les fonds marins, sont des sphères de quelques centimètres de diamètres essentiellement constituées de fer et manganèse. Elles contiennent également, en plus faibles quantités, de nickel, de cobalt et de cuivre, voire des traces de lithium, platine et terres rares¹²². Les nodules du seul océan Pacifique, le plus souvent concentrés sur les planchers océaniques entre 5 et 7 km de profondeur et sur des plateaux océaniques entre 1 et 2 km de profondeur, représentent plus de 2,5 milliards de tonnes de métaux, dont la teneur en manganèse moyenne est de 25 %. Ces minéralisations, si elles présentent des concentrations du même ordre de grandeur que celles des gisements terrestres exploités, offrent l'avantage de volumes très supérieurs aux réserves des gisements terrestres, notamment pour les substances cobalt-nickel. Néanmoins, leur exploitation n'est pas encore possible, pour plusieurs raisons. D'un point de vue technique, les tests à échelle réelle ont consisté en l'extraction des nodules avec quelques centimètres du fond marin, ce qui engendre des impacts environnementaux importants, notamment pour la survie d'espèces marines profondes, dont 70 à 90 % sont actuellement inconnues. La question du traitement du minerai, potentiellement à bord de bateaux est également à l'étude, avec la difficulté particulière que représentent la dispersion et la diversité des métaux.

¹¹⁹ <https://mer.gouv.fr/la-connaissance-de-locean-sera-enrichie-par-lobjectif-grands-fonds-marins-de-france-2030>

¹²⁰ https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2021-02/synthese_remima_vfinale.pdf

¹²¹ <https://www.cairn.info/revue-responsabilite-et-environnement-2017-1-page-75.htm>

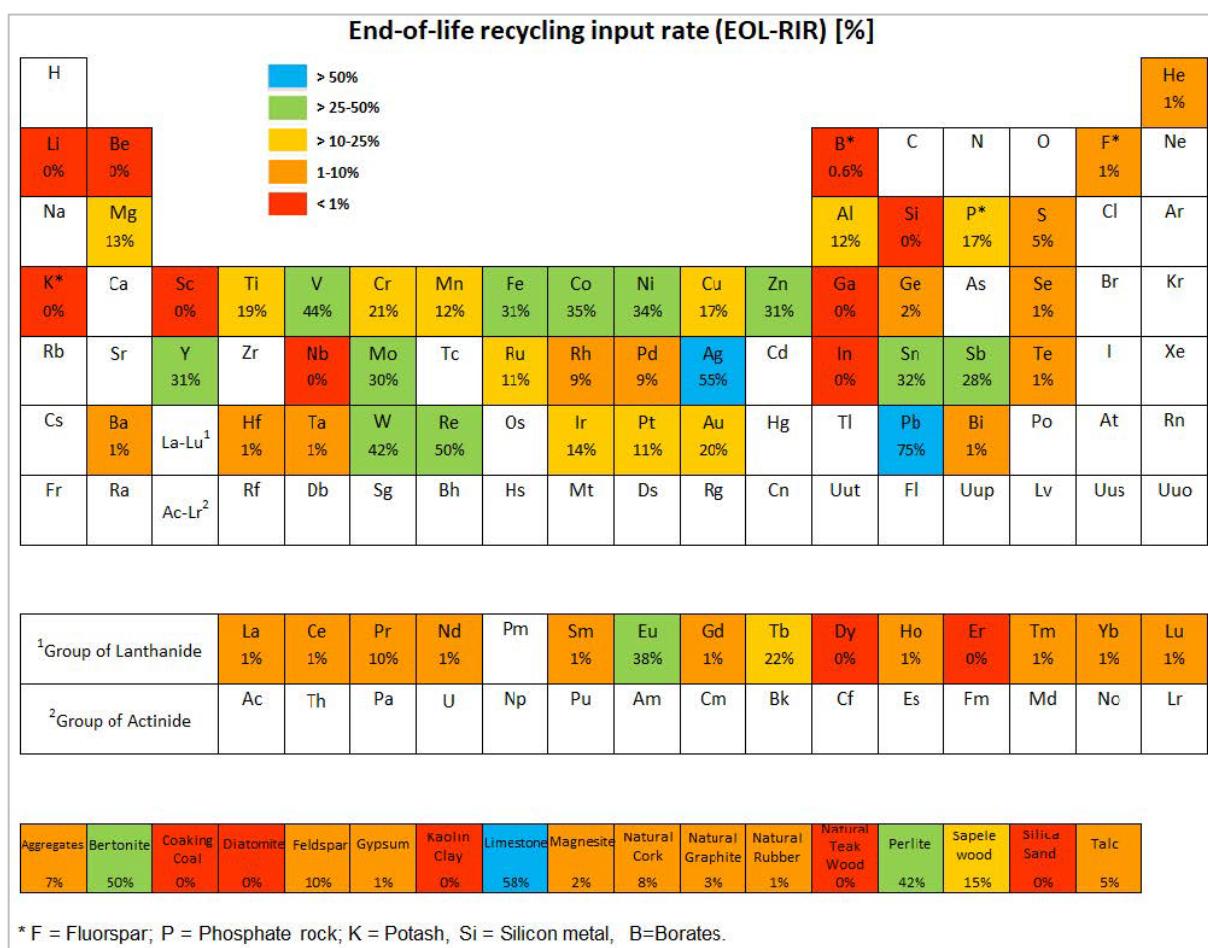
¹²² Stephen E. Kesler, Adam C. Simon - Mineral Resources, Economics and the Environment-Cambridge University Press (2015).

3. LE RECYCLAGE

L'offre en matières minérales dépend aussi des sources secondaires, et donc du recyclage. Le recyclage ne pourra suffire seul à répondre aux besoins en métaux, et encore moins dans le cas de marchés en forte croissance, du fait du délai nécessaire avant de récupérer la ressource. Le processus du recyclage pourra également mobiliser des matières différentes de celles contenues dans les déchets.

Par ailleurs, tous les métaux ne sont pas recyclables pour des applications de même valeur ajoutée, notamment en raison d'usages dispersifs ou d'alliages aux compositions complexes et variées. La figure 29 fournit à titre illustratif des ordres de grandeur en présentant les estimations de taux de recyclage pour différents métaux du tableau périodique dans le cas de l'Union européenne.

Figure 29 : taux d'entrée de recyclage en fin de vie (EOL-RIR) pour l'UE-28 sur la base des études MSA (lorsque disponibles) et utilisé pour dresser la liste 2017 des matières premières critiques pour l'UE



Source : Talens Peiro et al. (2018)¹²³

Il ressort que les métaux technologiques, notamment les terres rares, le gallium et le tantale, sont faiblement recyclés, et que, même pour les métaux dont le recyclage est possible, différents freins limitent la production secondaire.

L'accès aux déchets pour alimenter les chaînes de recyclage peut se révéler critique. Les aimants permanents des éoliennes en mer, dont la taille est conséquente, se révèlent ainsi plus intéressants à recycler que les petits aimants disséminés dans les moteurs des véhicules électriques. Un autre

¹²³ Talens Peiro, L., Nuss, P., Mathieu, F. and Blengini, G., *Towards Recycling Indicators based on EU flows and Raw Materials System Analysis data, EUR 29435 EN*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-97247-8 (online), doi:10.2760/092885 (online), JRC112720.

élément à prendre en compte pour la disponibilité immédiate des déchets peut être celui de la réutilisation. Par exemple, réutiliser des batteries de véhicules électriques pour du stockage stationnaire empêche, pour un certain temps, de recycler les métaux de batteries pour alimenter les *gigafactories*¹²⁴. Limiter l'emploi de certaines matières critiques dans les systèmes peut également rendre le recyclage moins compétitif. Ainsi la baisse de la teneur en cobalt et en nickel dans les nouvelles batteries NMC, le moindre usage de l'argent dans les modules photovoltaïques font baisser la valeur contenue dans les déchets, et s'agissant de teneurs plus faibles, augmentent la difficulté à les recycler de manière économique.

Globalement, la production secondaire présente plus d'intérêt lorsque les produits recyclés sont utilisables pour des applications à valeur ajoutée au moins équivalente à celles qui ont généré les déchets. Un contre-exemple est celui des pales d'éoliennes, constituées de matériaux composites (fibres de verre ou de carbone avec résine époxy) et qui sont difficilement recyclables pour les mêmes applications. Néanmoins, plusieurs projets visent à lever ces barrières pour permettre une réintégration des fibres recyclées dans la production de nouvelles pales¹²⁵.

POINTS ESSENTIELS

- La disponibilité géologique n'apparaît pas en général comme une contrainte importante pour la plupart des métaux étudiés. Néanmoins, la prise en compte de la hausse de la demande, de la baisse tendancielle de la qualité des gisements et du temps de développement nécessaire à la mise en place de nouvelles capacités de production génèrent des risques sur l'offre de métaux. Ces risques seront d'autant plus élevés que certains gisements se trouvent fréquemment dans des zones à risque sur les plans sociaux et environnementaux.
- Le recyclage, s'il ne peut suffire à lui seul à répondre à la demande, constitue un potentiel d'offre pour certains métaux. Le principal risque est de ne pas suffisamment y avoir recours, soit par manque de déchets à traiter, soit par inadéquation du gisement de déchets par rapport aux besoins, ou encore par la difficulté à produire les qualités correspondant aux besoins des filières aval. La complexification des systèmes et la baisse des teneurs en matières critiques, s'ils contribuent à réduire le besoin, rendent plus complexes le recyclage et la récupération des métaux.

¹²⁴ À noter que les scraps de production des *gigafactories* (7 % en fonctionnement, 20 % au démarrage), représentent par ailleurs une ressource valorisable immédiatement.

¹²⁵ Voir par exemple le projet Zebra.

D. Risques économiques et politiques

1. LA CONCENTRATION DE LA PRODUCTION ET LES RISQUES ASSOCIÉS : TRANSPORT ET GÉOPOLITIQUE

Si d'un point de vue global, la production minière mondiale totale semble bien répartie entre les différents continents, une étude métal par métal montre au contraire une forte concentration par pays de la production minière.

Pour chacune des matières minérales étudiées dont les données sont disponibles sur *World Mining Data*¹²⁶, la production minière des cinq premiers pays producteurs représente plus de 70 % du total (à l'exception du cuivre, 60 %). Cette concentration tend à être la plus forte pour les métaux technologiques et rares.

Les quatre rapports thématiques montrent une plus grande concentration encore sur les étapes de raffinage et de métallurgie par chaîne de valeur :

- Les acteurs chinois dominent la chaîne de valeur des modules photovoltaïques. Sur toutes les étapes des technologies cristallines, la part de marché des acteurs chinois est comprise entre 70 et 90 % de la production mondiale¹²⁷ ;
- La Chine possède plus de 40 % des capacités de fusion-affinage de cuivre (mais n'extrait que 8 % du minerai de cuivre) et produit plus de 50 % de l'aluminium primaire ;
- La Chine concentre 70 % des capacités mondiales de raffinage de nickel et cobalt, et produit 80 % du graphite pouvant servir à la fabrication d'électrodes négatives de batteries. Pour le manganèse métal, la part de la Chine est de 95 % ;
- Plus de 85 % du raffinage de terres rares et de la production d'aimants permanents sont réalisés en Chine. La Chine est même en monopole sur le segment des terres rares lourdes, de l'extraction à l'intégration aval dans des aimants.

Une autre forme de concentration est celle des entreprises et de leurs actionnariats. Des études complémentaires seraient nécessaires pour en évaluer les impacts, dans un contexte d'investissements directs massifs à l'étranger de grands groupes dans les secteurs miniers. En particulier, le gouvernement chinois conduit depuis une vingtaine d'années une politique volontariste en la matière, en incitant ses compagnies minières à acquérir des concessions à l'étranger (en Océanie et en Amérique du Sud) et à lancer des campagnes d'exploration en Afrique. Depuis 2002, le gouvernement chinois a signé des accords avec des pays africains, dont certains sous le coup de sanctions occidentales, afin d'exploiter leurs ressources en contrepartie d'investissements dans les infrastructures et de prêts aux États. La stratégie chinoise s'inscrit dans le cadre du plan *Made in China 2025*, qui vise à atteindre la première place mondiale dans les technologies de demain à l'horizon 2049¹²⁸, en particulier les technologies bas-carbone. La stratégie chinoise se distingue à plusieurs égards : sur le volume des investissements directs à l'étranger, estimés à 125 milliards de dollars sur les métaux non ferreux entre 2005 et 2021 ; sur l'échelle globale et la diversité géographique de ces investissements, qui concernent aussi bien l'Australie que l'Afrique, l'Amérique du Sud, etc. ; enfin sur la diversité des minéraux et métaux concernés : lithium, cobalt, nickel, mais aussi terres rares, bauxite, cuivre, etc.¹²⁹ Par ailleurs, cette stratégie globale d'investissements dans le secteur extractif se double d'une domination dans le secteur du raffinage, permettant à la Chine de bénéficier des synergies industrielles entre les deux premiers maillons de la chaîne de valeurs. La concentration des acteurs industriels qui en résulte, dans un contexte de forte intégration verticale de certaines chaînes de valeur (voir I.B.2), peut entraîner une perte de pouvoir de marché des producteurs qui doivent se fournir en intrants auprès d'un nombre limité de fournisseurs, dont certains sont des concurrents sur des marchés en aval.

¹²⁶ https://www.world-mining-data.info/?World_Mining_Data__Data_Section

¹²⁷ Voir tableau 5 du rapport d'étape n°1.

¹²⁸ Bonnet, T., Grekou, C., Hache, E. & Mignon V. (2022), Métaux stratégiques : la clairvoyance chinoise, Lettre du CEPPII n° 428.

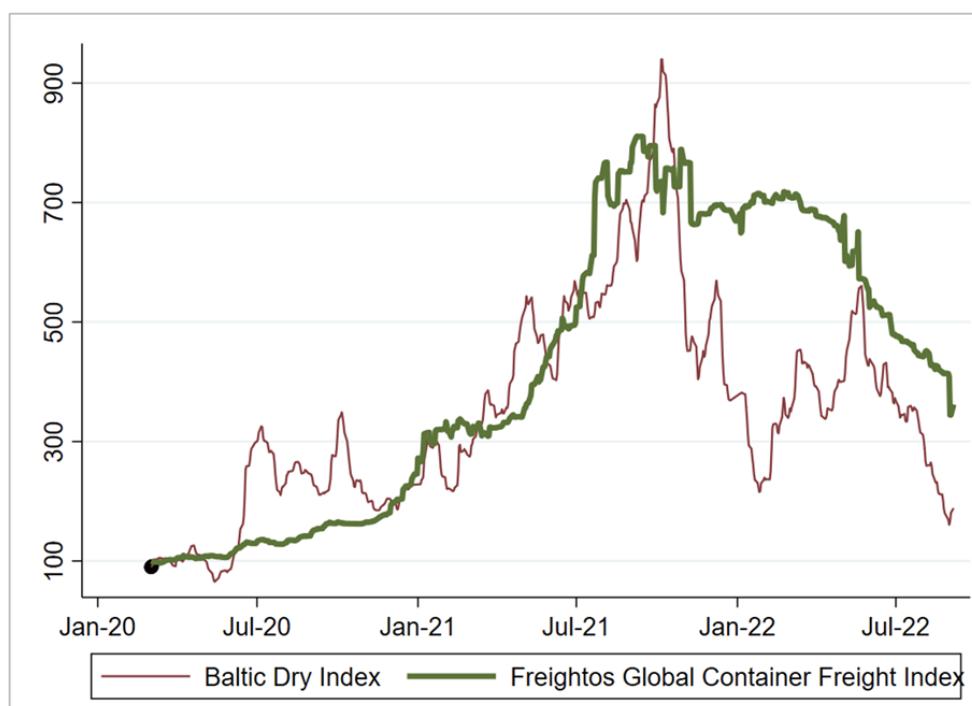
¹²⁹ Ibid.

Une conséquence de la concentration géographique des sites miniers est la dépendance aux réseaux de transports internationaux afin de garantir la livraison des biens. Cette dépendance présente trois types de risques : le risque de disponibilité (des moyens de transport et des infrastructures comme les ports, les routes et les canaux), le risque de prix et le risque géopolitique, lié aux fermetures ou à l'indisponibilité de certains passages ou de certaines infrastructures portuaires, comme cela a pu être étudié dans le secteur agricole et alimentaire¹³⁰. Les impacts environnementaux du secteur du transport, fortement émissif de gaz à effet de serre, sont par ailleurs significatifs.

Le premier risque a été illustré récemment en mars 2021 avec le blocage du canal de Suez pendant une semaine, qui a mis en lumière la dépendance européenne à cette route commerciale. De même, à la suite de la crise du Covid-19, des ports chinois, nord-américains et européens sont arrivés à saturation, provoquant des tensions sur certaines chaînes de valeur.

Les retards induits par les engorgements portuaires ont aussi réduit la disponibilité des bateaux et conteneurs, immobilisés dans les ports en attente de chargement ou déchargement. Ainsi, les prix pour le transport maritime de marchandises ont été multipliés par 7 environ entre janvier 2020 et juillet 2021, comme le montre la *figure 30*.

Figure 30 : indice des prix du transport maritime de janvier 2020 à juin 2022



Source : Ostry et al. (2022)¹³¹ avec des données de Bloomberg L.P.

Une autre conséquence de cette concentration à l'amont est le risque politique. Les pays producteurs ont la main sur le bon fonctionnement des chaînes de valeur mondiales et les pays occupant des positions stratégiques (ports, caps, détroits ou canaux difficilement contournables) peuvent perturber le transport international.

¹³⁰ Bailey, R., Wellesley, L. (2017), *Chokepoints and Vulnerabilities in Global Food Trade*, Chatham House Report.

¹³¹ Ostry, J.D., Jiménez, D., Deb, P., Furceri, D., Carriere-Swallow, Y. (2022), *Shipping costs are an important, and understudied, driver of global inflation*, VoxEU Column.

Parmi les précédents récents, nous pouvons citer la Guinée, producteur d'environ 22 % de la bauxite mondiale (nécessaire à la production d'aluminium, données USGS 2021), qui a connu un coup d'État en 2021, lequel s'est traduit par des hausses des prix de marché de l'aluminium. Les politiques minières engagées par l'Indonésie en 2014 s'opposant à l'exportation de minerais bruts en particulier de nickel afin de conserver un maximum de valeur ajoutée, illustrent également ce risque politique¹³², tout comme la crise des terres rares de 2011, déjà évoquée dans le rapport d'étape n°4 consacré à l'éolien et aux moteurs électriques.

La crise dite des terres rares a débuté en 2010, lorsque la Chine, principal producteur de terres rares (plus de 95 % de la production mondiale à l'époque), a diminué drastiquement ses quotas d'exportation (de 60 kt en 2005 à 30 kt en 2010¹³³), officiellement pour des raisons environnementales. Cette restriction à l'export a d'abord entraîné une flambée des prix des terres rares, puis a permis aux conglomérats chinois de prendre des positions vers l'aval, en produisant des aimants permanents plutôt que des produits intermédiaires. Cette intégration et la concentration de la production ont également permis une forte chute des prix des aimants permanents au cours des années 2010. Cette évolution s'est faite au détriment d'entreprises japonaises et occidentales (notamment Molycorp, devenue depuis Neo Performance Materials).

L'état des lieux des mesures restreignant l'exportation de matières premières réalisé par l'OCDE¹³⁴ montrait que, en 2010, la Chine appliquait des quotas et restrictions sur l'export de 38 métaux et 10 produits minéraux. Si de nombreuses restrictions ont depuis été levées, cette situation perdure en partie, comme le montre l'outil de visualisation disponible sur le site de l'OCDE.

2. COMMERCE INTERNATIONAL ET POLITIQUES INDUSTRIELLES

Les dernières décennies ont été marquées par un recul de la part de l'industrie dans l'économie française. En particulier, comme le note une étude du Pipame de 2015 consacrée aux métaux non ferreux en 2015, les grands groupes métallurgiques français intégrés verticalement ont disparu. Les acteurs français sont devenus plus spécialisés, soit sur un métal, soit sur une étape spécifique des chaînes de valeur. Les contre-exemples donnés à l'époque concernaient les deux entreprises minières et métallurgiques dont l'actionnariat est encore partiellement public : Eramet et Orano.

Ces évolutions font qu'aujourd'hui les installations industrielles françaises sont de plus petite taille que leurs équivalents étrangers, comme le note toujours le Pipame. Or nous avons constaté l'importance des rendements d'échelles, particulièrement sur les étapes de fabrication intermédiaires et de métallurgie. Par exemple, la domination chinoise sur la chaîne de valeur des terres rares lourdes s'exerce par des entreprises publiques de grande taille, intégrées verticalement, de la mine de terres rares à la production d'aimants permanents et diversifiées dans d'autres activités industrielles.

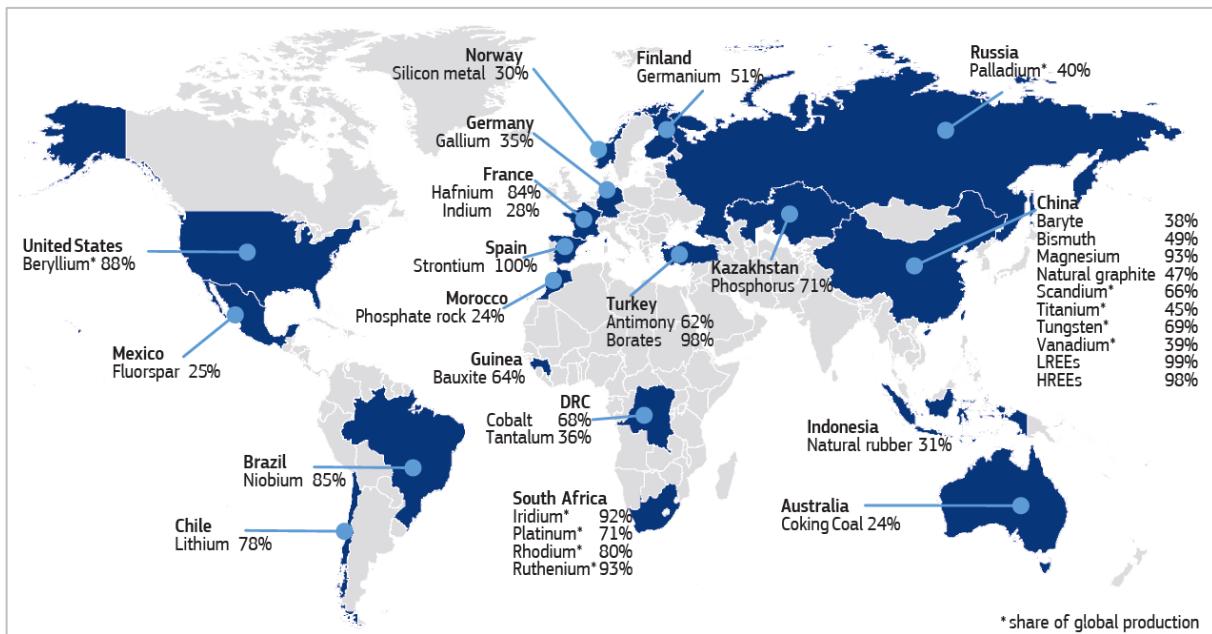
Ces éléments, ainsi que la baisse tendancielle des coûts de transport au cours des dernières décennies, ont permis une spécialisation sectorielle qui permet d'exploiter les avantages comparatifs des différents pays intégrés dans des chaînes de valeur mondiales. La figure 31 montre ainsi les spécialisations pays par pays pour certains métaux.

¹³² Voir par exemple <https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/prix-du-nickel-situation-depuis-lembargo-indonesien-sur-exportations-de-mineraux-bruts>

¹³³ Voir notamment Ressources minérales de Nicholas Arndt, Clément Ganino et Stephen Kesler, 2^e édition (2015).

¹³⁴ Fliess, B. et T. Mård (2012-11-13), États des lieux des mesures restreignant l'exportation de matières premières : Analyse des données de l'inventaire de l'OCDE, Éditions OCDE, Paris.

Figure 31 : importance de la production de certains minéraux par pays



Source : CRM Factsheet 2021

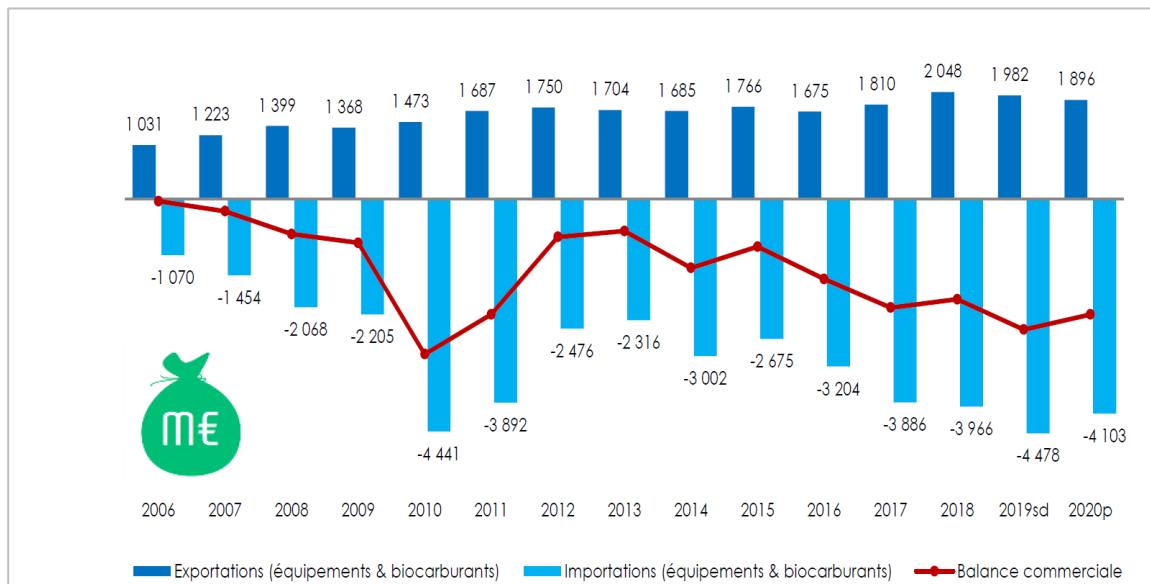
La Chine tient une place centrale dans la production de nombreux métaux¹³⁵. Cette place est particulièrement importante pour les technologies de la transition bas-carbone étudiées, ce qui se traduit par des relations commerciales déséquilibrées entre l'Europe et la Chine. La Chine bénéficie en effet de rendements d'échelles et des externalités positives de la concentration de l'industrie, en matière d'innovation et de synergies entre secteurs.

Selon une première analyse des données, l'Europe présente un déficit commercial croissant entre 2017 et 2019 sur les composants des chaînes de valeur étudiées dans le cadre des présents travaux. Les biens sur lesquels le déficit est le plus fort sont les modules photovoltaïques, les batteries Li-ion et les moteurs électriques. À l'inverse l'Europe présente un excédent sur les véhicules électriques et hybrides, et sur certains maillons des chaînes de valeur du cuivre et de l'aluminium.

En France, la détérioration de la balance commerciale depuis le milieu des années 2000 se confirme dans le secteur des énergies renouvelables, comme le montre la figure 32. La France étant aujourd'hui peu active dans l'extraction et le traitement des métaux, elle dépend très largement des importations pour ses approvisionnements.

¹³⁵ Voir également la lettre 428 de juin 2022 du CEPII.

Figure 32 : balance commerciale française du secteur des énergies renouvelables



Source : Ademe, In Numeri. 2021. Marchés et emplois concourant à la transition énergétique dans le secteur des énergies

La tendance à la concentration en Asie des étapes amont de la production des métaux peut rappeler un phénomène constaté dans l'industrie pharmaceutique. En effet, si l'Europe représente 75 % des exportations mondiales de produits pharmaceutiques, les industriels européens se sont concentrés sur les étapes aval de la production, à plus forte valeur ajoutée, en se reposant sur des fournisseurs d'Asie émergente pour les précurseurs des produits pharmaceutiques. Or, la concentration parmi ces fournisseurs s'est accrue, ce qui a augmenté la vulnérabilité de l'industrie pharmaceutique européenne¹³⁶. De tels constats peuvent conduire à infléchir, dans le contexte du début des années 2020, les politiques industrielles européennes afin de réduire ces dépendances au commerce international.

Un autre risque relatif au commerce international identifié par la Direction générale du Trésor en 2022¹³⁷ est celui du découplage entre la Chine et les États-Unis. Ces pays se positionnent comme exportateurs de matières premières et de produits intermédiaires de plus en plus nécessaires à la production européenne. La guerre commerciale entre ces deux pays présente donc un risque pour l'industrie européenne, et particulièrement pour la France qui dépend fortement d'intrants américains pour ses filières exportatrices. Plus récemment, l'*Inflation Reduction Act* a mis en exergue les enjeux liés au retour des politiques industrielles volontaristes en matière de développement des technologies bas-carbone, de coordination des efforts d'investissements au niveau global, et les préoccupations qui en résultent en matière de distorsion de concurrence.

Enfin, l'importance du commerce international s'accompagne d'externalités négatives, notamment sur le plan environnemental. La mise en place du mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF), pourrait contribuer à encourager la production de certains composants et métaux en Europe tout en réduisant les impacts environnementaux de ces productions¹³⁸.

¹³⁶ http://www.cepii.fr/PDF_PUB/lettre/2022/let423.pdf

¹³⁷ <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2022/06/28/l-union-europeenne-au-defi-du-decouplage-des-chaines-de-valeur-sino-americaines>

¹³⁸ Voir par exemple <http://www.cepii.fr/BLOG/bi/post.asp?IDcommunique=921>

3. FINANCIARISATION DES MARCHÉS DES MÉTAUX ET RISQUE-PRIX

La financiarisation consiste en l'augmentation de l'importance des marchés financiers, notamment de produits dérivés, pour l'industrie d'un métal. Cette financiarisation est liée à l'apparition d'acteurs financiers en plus des acteurs qui réalisent des transactions physiques de métaux.

Les principaux marchés occidentaux de matières premières, également prédominants pour les métaux, sont le *London Stock Exchange* et le *Chicago Mercantile Exchange*. Plusieurs bourses chinoises ont par ailleurs introduit des produits dérivés, notamment le *Shanghai Futures Exchange* (divers métaux de base et précieux), le *Shanghai International Energy Exchange* (cuivre), le *Baotou Rare Earth Products Exchange* et le *Ganzhou Rare Metal Exchange* (bourses régionales, uniquement accessibles aux résidents de Chine et spécialisées dans les terres rares).

L'apparition de contrats dérivés sur les métaux répond à deux objectifs. Le premier est de permettre la formation de prix de référence observables par tous les acteurs d'une chaîne de valeur. Ce prix observable est utilisable pour la prise de décision, sur les niveaux de production et d'investissement dans les capacités de production. Le second est de protéger les acteurs de marché contre les variations de prix. En général le producteur se couvre contre une baisse des prix et l'acheteur contre une hausse. Ce transfert de risque nécessite d'autres acteurs que les industriels, des spéculateurs qui acceptent de se porter contrepartie et d'offrir de la liquidité sur les marchés financiers.

La financiarisation du secteur est hétérogène selon les types de métaux considérés. Les métaux de base, comme le cuivre, l'aluminium ou le nickel, bénéficient des contrats très liquides échangés sur les principaux marchés financiers. Au contraire, les marchés des métaux technologiques, comme le cobalt ou le lithium, sont moins liquides (lorsque des produits dérivés existent) et sont souvent spécifiques à des bourses régionales, comme les terres rares sur certaines places en Chine. Yves Jegourel¹³⁹ explique ces différences entre métaux, par une structure oligopolistique de la production et par les interventions des pouvoirs publics, qui permettent de limiter la variation des prix et de ne pas avoir besoin de se protéger du risque prix par ailleurs.

Le risque de prix peut être partagé entre les différents acteurs du marché physique (producteur, consommateur, négociant), les marchés financiers permettant son externalisation vers d'autres acteurs. Un autre moyen est l'intervention des pouvoirs publics, par fixation des prix, de subventions ou par une politique de stocks stratégiques.

Le développement des marchés financiers de matières premières s'accompagne de leur internationalisation. Celle-ci engendre une plus grande interdépendance entre les économies. Plusieurs types de stocks coexistent, pouvant avoir un impact sur les marchés de matières premières. Les stocks stratégiques de métaux gérés par les États ont été fortement réduits au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle (jusque dans les années 1970, le stock stratégique des États-Unis devait permettre d'approvisionner le pays en métaux pendant trois ans), les stocks restants en Europe et aux États-Unis sont aujourd'hui des stocks d'hydrocarbures. On note toutefois aux États-Unis un retour en force des préoccupations liées aux stocks stratégiques, depuis notamment l'embargo des terres rares par la Chine en 2010, après des années de « dépolitisation » du sujet. Les stocks stratégiques constituent aujourd'hui un des volets de la stratégie des États-Unis en matière de minerais et métaux stratégiques, avec notamment la création d'une « agence interdépartementale dédiée à l'acquisition et au recyclage de matériaux clés pour les technologies bas-carbone »¹⁴⁰. Cependant, il convient de noter que les stocks de minerais et métaux des États-Unis ont vocation à être mobilisés pour les besoins militaires ou en situation d'urgence nationale, pas pour intervenir sur les marchés pour stabiliser les prix, ce qui constitue une différence avec le système de stockage chinois¹⁴¹. La *Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC)* a constitué des stocks de métaux rares avec l'objectif de limiter les risques de pénuries de court terme.

¹³⁹ Comme évoqué dans le chapitre 2 de *L'économie des ressources minérales et le défi de la soutenabilité, tome 1* (Florian Fizaine, Xavier Galiègue, 2021).

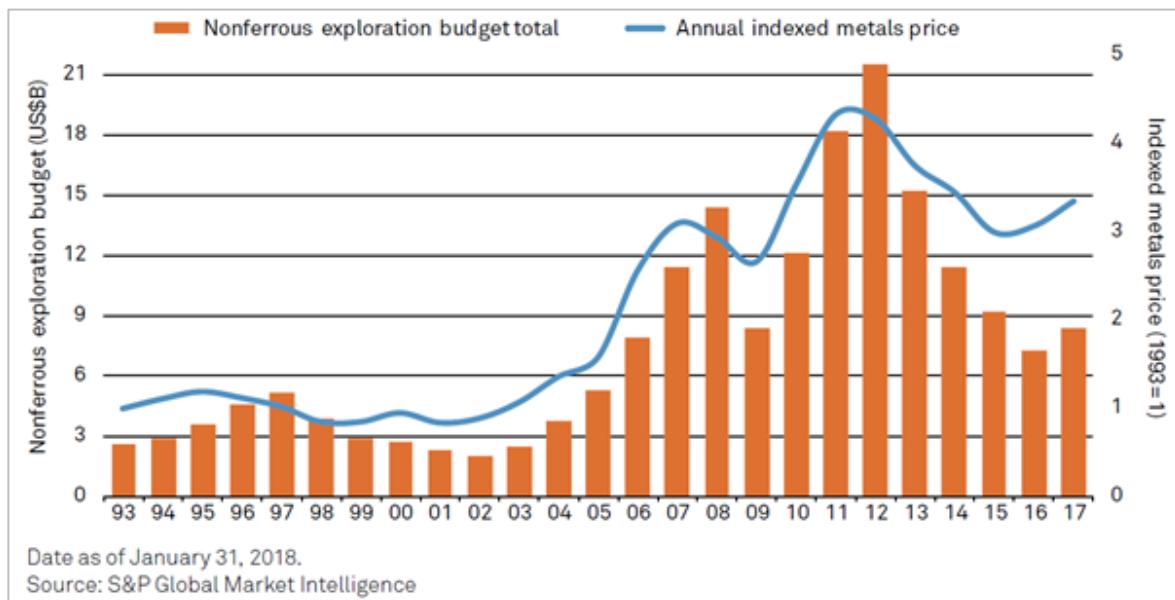
¹⁴⁰ Hache E., Laboué P., Lapi T., Al Amir R. (2022), *La stratégie des États-Unis dans la géopolitique des métaux critiques*, Rapport #12, Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques (OSFME), IRIS - Enerdata - Cassini – DGRIS

¹⁴¹ Ibid.

La gestion des stocks stratégiques restants peut toutefois avoir un impact sur le marché. Par exemple, la *Defense Logistics Agency* des États-Unis gère toujours un stock valorisé à plus d'un milliard de dollars¹⁴². Plus récemment, la *China's National Food and Strategic Reserves Administration* a annoncé mettre aux enchères une partie de ses stocks de cuivre, d'aluminium et de zinc, afin de stabiliser les prix de ces métaux¹⁴³.

Les acteurs financiers ont un impact important sur l'offre et la demande, à la fois à court terme par les activités d'intermédiation et par les phases de stockage et déstockage, mais aussi à plus long terme. La figure 33 montre l'évolution conjointe entre un indice de prix des métaux non ferreux (ligne bleue), et les budgets d'exploration alloués. Ce lien tend néanmoins à s'estomper depuis le milieu des années 2010.

Figure 33 : budgets d'exploration et indice des prix des métaux non ferreux



Source : S&P, *World Exploration Trends 2018*.

Une part significative de l'exploration minière est réalisée par des juniors minières (70 % des découvertes en Australie), sociétés souvent constituées à des fins d'exploration, par opposition aux majors, grandes sociétés qui opèrent sur plusieurs types de mines (moins de 10 % des découvertes en Australie).

Il n'existe pas de consensus clair sur le rôle des marchés financiers dans la volatilité des prix des métaux. Il semble que l'introduction d'un marché spot¹⁴⁴ sur un métal augmente sa volatilité, tandis que l'introduction de produits dérivés¹⁴⁵ tend à la réduire. Enfin, si la littérature ne présente pas de consensus établi sur leurs déterminants et paramètres, les prix des métaux tendent à présenter une cyclicité au cours du temps, en liaison notamment avec les cycles d'investissements.

¹⁴² Consulter par exemple <https://www.dla.mil/Strategic-Materials/About/>

¹⁴³ <https://news.metal.com/newscontent/101506758/national-food-and-strategic-reserves-administration-to-release-copper-aluminium-and-zinc-stocks>.

¹⁴⁴ Cotation d'un prix de marché correspondant à un échange immédiat.

¹⁴⁵ Contrat entre parties qui fixe des flux financiers futurs fondés sur ceux d'un actif sous-jacent.

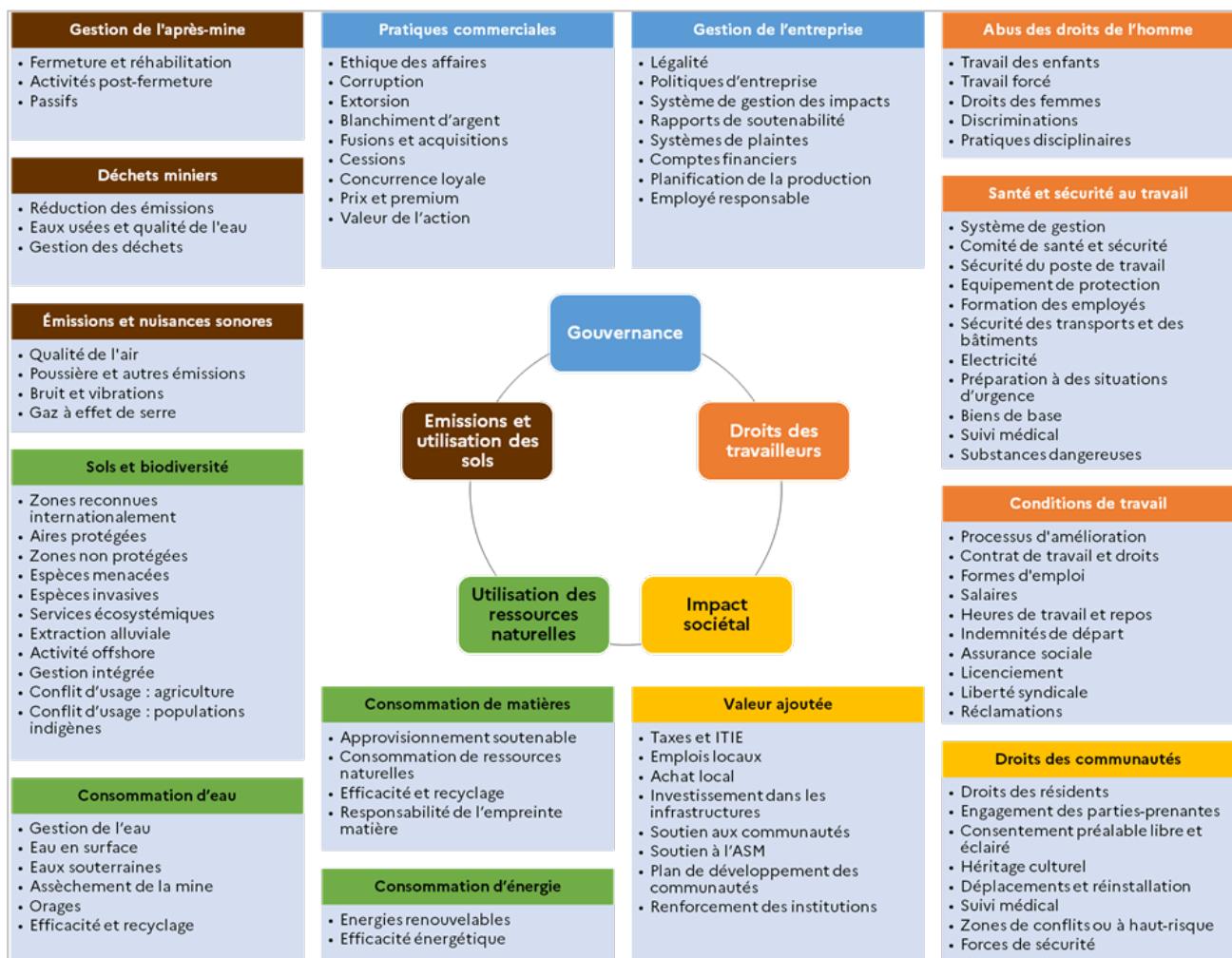
POINTS ESSENTIELS

- L'extraction minière de métaux est souvent concentrée géographiquement, dans les pays qui disposent des meilleurs gisements. Néanmoins, à l'exception du cobalt en République démocratique du Congo et des terres rares lourdes en Chine, aucun des minéraux étudiés dans le plan ressources n'est extrait à plus de 50 % dans un seul pays.
- Le segment des chaînes de valeur sur lequel la concentration est la plus forte est celui des transformations intermédiaires. La Chine domine notamment les étapes de raffinage et de métallurgie de la plupart des chaînes de valeurs étudiées.
- En particulier, la Chine concentre plus de la moitié des capacités mondiales de production sur les chaînes de valeur du silicium solaire, des précurseurs de batteries Li-ion (particulièrement sulfates de nickel, sels de cobalt et graphite) et des terres rares. Les entreprises chinoises de ces secteurs sont souvent intégrées verticalement et sécurisent leurs approvisionnements par des investissements directs à l'étranger dans des mines et entreprises minières, notamment en Afrique et en Amérique du Sud.
- D'autres facteurs économiques induisent des risques sur les prix des minéraux. À court terme, les évolutions de stocks des États, industriels et acteurs financiers peuvent être déterminantes pour les prix de marché. À plus long terme, les dynamiques financières contraignent les stratégies des acteurs industriels et influent sur les décisions d'investissement et le potentiel d'offre de métaux. La réponse des pouvoirs publics aux risques induits par ces mouvements de prix doit distinguer les dynamiques de court terme, notamment liées aux excès des marchés financiers, et les dynamiques structurelles de plus long terme.
- La mondialisation des dernières décennies représente des risques et des contraintes dans les chaînes de valeur étudiées.
- La spécialisation sectorielle au niveau mondial, conséquence de l'augmentation du commerce international et de frais de transport réduits, favorise la concentration dans les industries qui présentent des rendements d'échelle. C'est notamment le cas des chaînes de valeur étudiées de la transition bas-carbone, sur lesquelles la Chine apparaît comme un acteur majeur dont l'Europe et la France dépendent.
- La financiarisation est hétérogène selon les métaux considérés et permet dans certains cas une gestion du risque de prix par les marchés financiers. La globalisation financière rend les différents marchés et les différentes économies plus interdépendants.

E. Risques environnementaux et sociaux

Les impacts environnementaux et sociaux des technologies bas-carbone constituent un enjeu croissant de la transition bas-carbone et prennent de plus en plus de place dans le débat public sur l'acceptabilité du déploiement des énergies renouvelables. Pour certains, la transition bas-carbone pourrait exacerber des risques environnementaux et sociaux déjà existants ou engendrer des nouveaux risques. Ces risques sont très variés : utilisation accrue de ressources naturelles, dégradation de la qualité de l'air, droits des travailleurs, problèmes de santé et de sécurité au travail, possibles abus en matière de droits de l'homme, etc. Une étude récente propose une cartographie de ces différents types de risques associés à l'industrie minière (*figure 34*).

Figure 34 : 86 problématiques de l'industrie minière



Source : travail de V. Elie, *La mine responsable* (BGRM)

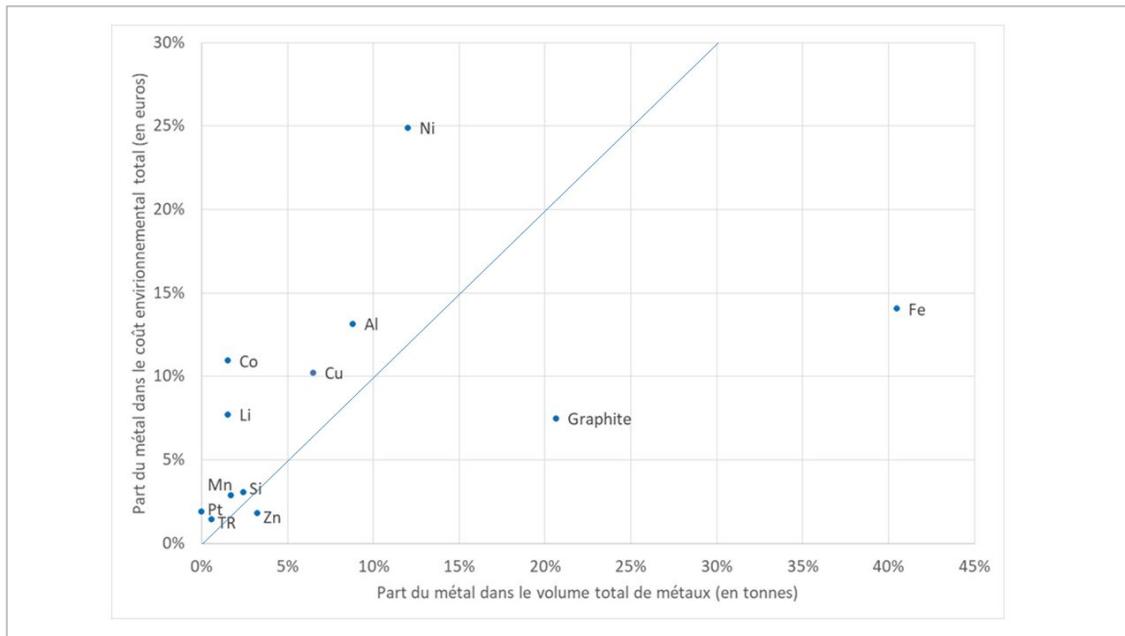
1. RISQUES ENVIRONNEMENTAUX

a) Évaluation globale des risques environnementaux de la transition bas-carbone

Il est difficile de quantifier ces risques pour les mettre en regard des bénéfices attendus de la transition bas-carbone. Les estimations des coûts associés aux impacts environnementaux liés aux ressources minérales pour la transition bas-carbone sont rares. Un récent travail d'Arendt et al. (2022)¹⁴⁶ apporte de premiers éléments en la matière. Les auteurs quantifient l'impact environnemental¹⁴⁷ de la demande en ressources minérales de la transition bas-carbone de l'UE en 2050, en matière non seulement d'émissions de gaz à effet de serre, mais aussi d'épuisement des ressources minérales, d'occupation des sols, et de consommation d'eau potable. En utilisant des bases de données internationales de valeurs monétaires des externalités environnementales, ils démontrent que le coût environnemental total de la demande en ressources minérales pour la transition bas-carbone représente 3,7 % des coûts que l'UE génère en raison de son niveau actuel d'émissions de CO₂ sur le territoire¹⁴⁸. Au niveau de l'Union européenne, ces résultats confirment que les avantages d'une transition bas-carbone dépasseraient donc largement les coûts externes environnementaux associés à la demande de ressources minérales qu'elle entraînerait.

Ces mêmes auteurs ont cherché à pousser leur analyse un peu plus loin et selon les hypothèses retenues et les modèles utilisés, ils montrent qu'au total, les coûts environnementaux les plus élevés concernent le nickel (24,9 % des coûts totaux), suivi par l'aluminium (13,1 %), le cobalt (10,94 %), le cuivre (10,2 %), le lithium (7,7 %) et le graphite (7,5 %). Ces coûts environnementaux dépendent en partie du volume de métaux et minerais extraits, mais cette relation n'est pas absolument proportionnelle : certains métaux comme le lithium, le cobalt, le cuivre et le nickel représentent une part des coûts environnementaux plus que proportionnelle à leur volume extrait, à l'inverse du fer ou du graphite, dont les coûts environnementaux par unité de volume extrait sont inférieurs (figure 35).

Figure 35 : volume des métaux utilisés et leur part dans le coût environnemental total



Source : Arendt (2022)

¹⁴⁶ Arendt, R., Bach, V., & Finkbeiner, M. (2022). Environmental costs of abiotic resource demand for the EU's low-carbon development. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106057.

¹⁴⁷ Les impacts environnementaux de l'étude proviennent de différents articles et bases de données des métaux mobilisés par les moteurs électriques, les batteries de véhicules électriques, le photovoltaïque et l'éolien. Les émissions de GES sont exprimées en tCO₂eq/kg de matériaux et pour un coût de 290 €/tCO₂. Les coûts de l'épuisement des ressources sont tirés d'une étude qui propose des estimations fondées sur la règle de Hotelling. L'occupation des sols en matière de perte de services écosystémiques est exprimée par la surface occupée par la mine fois le nombre d'années d'occupation. Les impacts de la consommation d'eau incluent les effets sur la santé humaine, la perte d'espèces liée au stress hydrique, et la perte de rendements agricoles.

¹⁴⁸ En considérant le chiffre des émissions de 3,6 milliards de tonnes d'équivalents CO₂ et un prix du carbone de 290 € la tonne.

En considérant les différents types d'impacts, l'étude montre que les impacts sur le changement climatique représentent 47,5 % des coûts totaux et l'épuisement des ressources 45 %. L'occupation des sols représente en moyenne 5,4 % des coûts mais pour certains métaux comme le zinc, les terres rares, le manganèse et le graphite, les coûts peuvent excéder 10 %. La consommation d'eau atteint 2 % des coûts mais pour le lithium, les terres rares et l'aluminium, ils peuvent être plus élevés mais toujours en dessous de 10 %. Les coûts liés à l'occupation des sols sont principalement générés par le graphite (25 %), le cobalt (13 %), et le manganèse (11 %). Les coûts d'utilisation de l'eau les plus élevés sont causés par le lithium (34 %), l'aluminium (30 %) et le nickel (15 %).

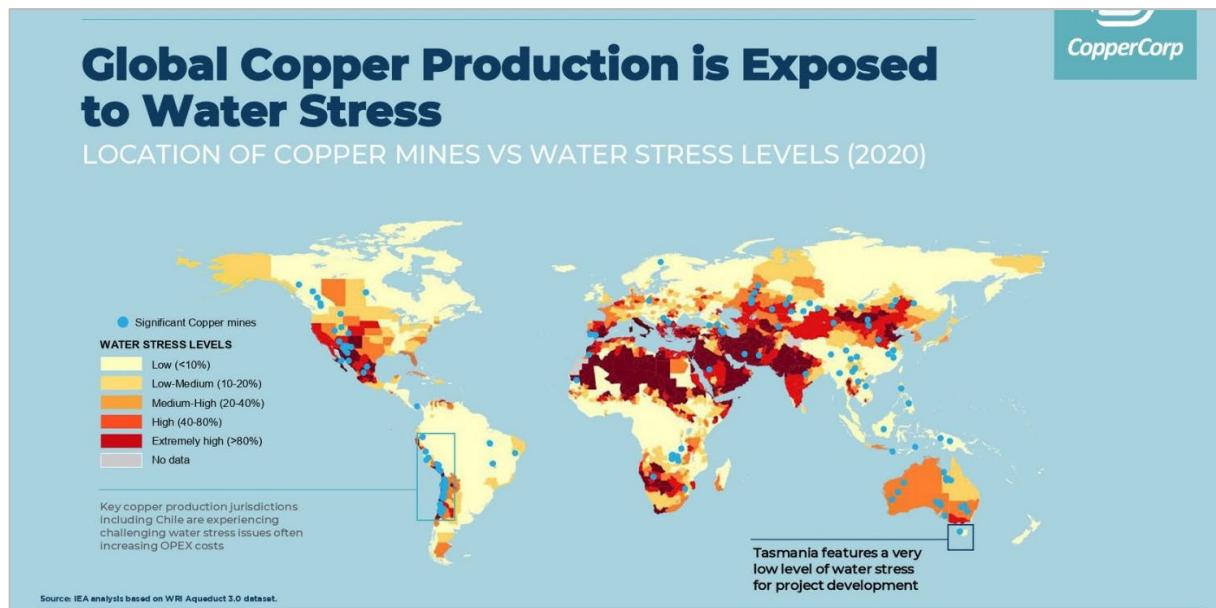
Concernant le nickel, ses impacts représentent 20 % de l'impact sur le climat, 15,3 % de l'impact sur l'eau, 10 % de l'impact sur les terres et 32 % des coûts d'épuisement des ressources. Enfin, la plupart des coûts sont liés aux matériaux nécessaires aux technologies des batteries (nickel, graphite, cobalt, lithium). Leurs coûts peuvent être de 53 %.

b) Les risques liés à l'eau peuvent contraindre la production minière

Les risques environnementaux pourraient à l'avenir affecter la capacité à produire sur certains sites miniers, à travers leurs effets sur le manque de ressources nécessaires à l'extraction et à la première transformation (eau, énergie, etc.) et la vulnérabilité des sites aux conditions climatiques (sécheresse, montée des eaux, déstabilisation des sols, etc.).

Les risques liés à la disponibilité en eau, notamment, pourraient affecter les activités d'extraction des mines de cuivre et des salars de lithium. Un manque de disponibilité en eau nécessaire à la production minière constituerait une forme de « criticité hydrique » et nécessiterait des réponses pour s'y adapter : nouvelles infrastructures, nouveaux procédés, etc. Elle pourrait aussi entraîner localement des conflits d'usages sur la ressource en eau et de possibles oppositions des populations locales.

Figure 36 : exposition de la production mondiale de cuivre au stress hydrique



Source : CopperCorp

c) Risques liés aux impacts sur les écosystèmes et biodiversité

L'exploitation minière entraîne une perte massive d'habitats pour une diversité d'espèces végétales et animales allant des micro-organismes du sol aux grands mammifères. La végétation ainsi détruite (sites d'alimentation, de nidification, de repos ou d'abris pour échapper aux prédateurs) peut entraîner un risque d'extinction de nombreuses espèces et en particulier des espèces endémiques inféodées à ces seuls habitats. Par ailleurs, l'impact de la destruction d'habitats est d'autant plus important si la zone d'exploitation recoupe des zones reconnues d'intérêt pour la biodiversité, comme l'illustre la déforestation en Amazonie pour l'exploitation de la bauxite¹⁴⁹ ou en Australie pour l'exploitation du cuivre. Plus généralement, le risque de déforestation lié aux activités minières pourrait être sous-estimé, car il ne concerne pas que le site minier lui-même, mais peut étendre ces effets à des dizaines de kilomètres alentour, via la construction d'infrastructures, l'installation d'habitants pour travailler dans les mines, etc. Une étude a ainsi estimé qu'au Brésil, entre 2005 et 2015, les activités minières ont pu représenter jusqu'à 9 % de la déforestation totale¹⁵⁰.

Il en est de même pour le morcellement de l'habitat qui se produit lorsque de grandes portions de terres sont scindées en des parcelles de plus en plus petites. Ce morcellement rend difficile ou impossible la dispersion des espèces autochtones d'une parcelle à une autre entravant ainsi les routes migratoires naturelles. L'isolement peut conduire à un déclin des espèces locales ou des effets génétiques comme la consanguinité. Les espèces qui nécessitent des parcelles de forêts importantes peuvent ainsi disparaître.

D. Smith et J. Wentworth (2022) indiquent que « l'exploitation minière est responsable d'environ 7 % de la perte annuelle de forêts dans les pays en développement ». En France, l'ordonnance sur l'adaptation en outre-mer du code minier vise à s'assurer que les projets miniers soient véritablement compatibles avec l'environnement, notamment en matière de protection de la biodiversité et de la forêt primaire. L'État pourra ainsi désormais refuser un projet minier sur la base de critères environnementaux.

Dans le cadre de projets miniers « responsables », des études d'impacts environnementaux sont réalisées en amont de l'ouverture de la mine et des mesures compensatoires envisagées et mises en œuvre par l'exploitant, sous le contrôle des autorités locales compétentes. Leur respect dépend donc également de chaque géographie.

Les impacts environnementaux des activités minières peuvent se traduire par des problèmes d'acceptabilité des populations locales, pouvant aller jusqu'à des situations de conflits et de blocage de la production. Par exemple, aux Philippines en 2017, les atteintes à l'environnement (en particulier la pollution des cours d'eau) et les conflits en résultant ont conduit le gouvernement à ordonner la fermeture temporaire de 17 mines de nickel.

Le risque peut également porter sur le développement de nouveaux projets. Par exemple, le projet de Pebble, situé en Alaska non loin de la baie de Bristol, a des ressources évaluées à 37 millions de tonnes de cuivre contenu, soit un gisement de classe mondiale. Son exploitation future est régulièrement remise en cause du fait des impacts environnementaux et sociaux potentiels. En effet, le projet avait été bloqué par l'Agence de protection de l'environnement (EPA) sous la présidence Obama car jugé trop impactant sur la zone, qui abrite la plus grande réserve au monde de saumons rouges (46 % des saumons sauvages dans le monde proviendraient de cette baie). Pour l'EPA et les nombreux opposants au projet, l'exploitation de la mine contaminerait beaucoup de cours d'eau et de lacs, et pourrait faire perdre 6 000 emplois liés à la pêche. De plus, la baie de Bristol abrite une quinzaine de tribus amérindiennes, majoritairement opposées au projet. Si l'administration Trump a levé ce blocage, la mise en exploitation demeure très hypothétique à ce jour.

¹⁴⁹ Le Brésil est le 4^e producteur mondial de bauxite et selon la revue *Forests & Finance*, avril 2022 : « dans l'Amazonie brésilienne, l'exploitation minière a entraîné la destruction de 1,2 million d'hectares (12 000 kilomètres carrés) entre 2005 et 2015, ce qui représente environ 9 % du recul de la forêt amazonienne durant cette période ». À titre de comparaison, l'IUCN estime qu'entre 2004 et 2017, l'Amazonie a perdu 15,4 % de son couvert forestier du fait des activités agricoles et d'un élevage extensif de bétail.

¹⁵⁰ Sonter LJ, Herrera D, Barrett DJ, Galford GL, Moran CJ, Soares-Filho BS (2017), *Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon*, *Nature Communications*, Vol. 18;n° 8(1):1013. doi: 10.1038/s41467-017-00557-w.

Les risques sociaux, souvent liés aux risques environnementaux, incluent les grèves, les oppositions de populations locales aux projets industriels et les risques de réputation et de boycott. Ces risques sont en interaction avec les risques politiques, comme illustré par les différents mouvements de grève de mineurs au Chili, et le conflit d'usage de la ressource en eau entre les populations locales et les industries extractives.

Au niveau géopolitique aussi, ces risques peuvent se matérialiser à travers des sanctions contre des pays qui ne satisfont pas aux normes internationales sur les plans sociaux et environnementaux. Un exemple est l'interdiction en 2022 par les États-Unis de l'importation de polysilicium du Xinjiang en raison de soupçons de recours au travail forcé. Ces sanctions imposées par des acteurs majeurs du commerce international peuvent se répercuter sur les chaînes de valeur, à travers l'interdiction d'exporter ou d'importer des composants critiques¹⁵¹.

2. RISQUES SOCIAUX

La prise en compte des enjeux sociaux pour les technologies vertes est essentielle, à la fois pour assurer une cohérence éthique aux efforts de développement des énergies décarbonées, mais aussi pour assurer la confiance du public et prévenir les entreprises européennes concernées de risques de réputation.

Les problématiques d'acceptabilité locale des activités minières, de gestion des impacts sociaux ainsi que de potentiels conflits avec les populations sont autant de facteurs prenant une importance grandissante sur l'approvisionnement mondial en matières premières. En effet, qu'il s'agisse de l'ouverture de nouvelles mines ou de blocages temporaires de production, la non-prise en compte de toutes les parties prenantes peut avoir des répercussions directes et de grande ampleur qu'il est indispensable de considérer.

Plusieurs exemples récents concernent par exemple le marché du cuivre. En Indonésie (mine de Grasberg) ou au Chili, les conflits récurrents avec les populations locales ou les employés des mines ont pu bloquer la production pendant plusieurs mois ces dernières années, avant de trouver des accords sur une amélioration des conditions de travail.

Les métaux de transition sont peu concernés par la question des « minerais de conflits », mais peuvent être exposés à de nombreux autres enjeux sociaux. En effet, cette question des « minerais de conflit » a fortement marqué l'agenda public international et est à l'origine des premières initiatives pour l'approvisionnement responsable en minerais. Le processus de Kimberley a ainsi abouti en 2003 à un régime international de certification des diamants afin de briser le lien entre le commerce de ces pierres précieuses et le financement de groupes armés dans la région des Grands Lacs africains. En 2017, le règlement européen 2017/821 sur les minerais de conflit dit règlement « 3TG » (tantale, tungstène, étain, or) a introduit une obligation de devoir de diligence sur les chaînes d'approvisionnement pour les importateurs européens d'étain, de tantale, de tungstène et d'or provenant de zones de conflit ou à haut risque. Ces minerais et métaux dits de « conflit » concernent plutôt les filières de l'électronique, du luxe, de l'outillage et de la défense, donc assez peu les technologies de la transition énergétique (ils peuvent toutefois être utilisés dans l'électronique associée, par exemple les condensateurs au tantale pour l'électronique de contrôle).

Dans la même optique que la loi américaine Dodd-Frank de 2010, le règlement européen « 3TG », soutenu par la France, fixe des obligations liées au devoir de diligence à l'égard de la chaîne d'approvisionnement pour les importateurs européens de ces minerais (traçabilité de flux, gestion responsable des sources, etc.). Les importateurs de l'Union européenne doivent vérifier que leurs minerais et métaux mis en libre circulation ont été obtenus de manière responsable.

Enfin, il convient de ne pas négliger le cadre, démocratique ou non, de la juridiction où a lieu l'activité minière : l'Union européenne est par exemple caractérisée par l'adhésion de l'ensemble de ses États membres à la Convention d'Aarhus, qui assure l'accès à l'information, la participation du public et l'accès à la justice en matière environnementale ; dans la pratique, ces exigences démocratiques nécessaires compliquent fortement le développement d'activités minières, la question de l'acceptation du public devient centrale, et nombre de projets se voient fragilisés

¹⁵¹ Pour le cas des tensions commerciales Chine-États-Unis, voir notamment : <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2022/06/28/l-union-europeenne-au-defi-du-decouplage-des-chaines-de-valeur-sino-americaines>

par l'activisme des ONG devant les tribunaux. Ce niveau élevé de garantie des droits est partagé par de nombreux pays membres de l'OCDE. À l'inverse, d'autres projets existent dans des pays où l'exercice de ces droits est fortement limité, de même que la capacité d'un auditeur indépendant à s'y rendre sans subir de pressions ; on peut citer l'exemple de la mine de nickel de la ville de Norilsk en Russie, ancien goulag, qui a conservé son statut de « ville semi-fermée », dont l'accès pour les étrangers se fait sous le contrôle du service de renseignement russe (FSB).

Ainsi, selon les juridictions, les questions de participation du public, voire de l'acceptation du public, de la transparence sur les aspects sociaux ou environnementaux prennent alors un sens très différent : les contre-pouvoirs à d'éventuelles atteintes commises par les sociétés minières s'en trouvent de même très réduits. Telles que pratiquées à l'heure actuelle, les approches ESG (environnement, social, gouvernance) peinent à prendre en compte ces aspects, qui ne sont à proprement parler pas du ressort des entreprises situées dans ces pays, bien qu'elles puissent en être « bénéficiaires ». Se pose alors la question du choix d'opérer ou de se fournir dans ces territoires, en tenant compte, sous certaines conditions, des impacts que peut avoir un éventuel boycott sur les populations concernées.

Ce constat et cette vigilance sont d'autant plus nécessaires qu'on observe à la fois un déplacement des activités extractives vers des pays moins-disants sur le plan démocratique, et une plus grande difficulté pour la société civile occidentale à s'intéresser et à s'informer sur les conditions de ces activités.

Par ailleurs, la Commission européenne souhaite mettre en place un dispositif pour empêcher l'entrée sur le marché européen de produits issus du travail forcé. Début juin 2022, le Parlement européen a adopté sur le sujet une résolution non contraignante et ne mentionnant pas la Chine. En septembre 2022, la Commission a publié une proposition de réglementation européenne visant à interdire la mise sur le marché de produits ayant eu recours à du travail forcé pour leur fabrication. Toutes les entreprises, quelle que soit leur taille seraient concernées par cette obligation de devoir de diligence sur leur chaîne d'approvisionnement. Les États membres pourront mener des enquêtes auprès de certaines entreprises jugées particulièrement à risque, et sur cette base, décider de l'interdiction de mise sur le marché ou d'exportation de la marchandise. Un « réseau européen contre les produits liés au travail forcé » sera créé afin de faciliter la collaboration entre les autorités compétentes des États membres et la Commission européenne.

En Allemagne, le Bundestag a voté en juillet 2021 *The Supply Chain Due Diligence Act (SCDDA)* qui à partir de 2023 obligera les entreprises de plus de 3 000 salariés à éviter les entorses au droit du travail et les impacts environnementaux négatifs de leurs chaînes d'approvisionnement (cf. analyse Deloitte¹⁵²). Les exigences requises se heurtent à des verrous juridiques à lever : anti-trust, confidentialité des données, secret des affaires, etc.

Cette avancée est le pendant de l'*Uyghur Forced Labor Prevention Act*, signé par Joe Biden en décembre 2021 et entré en vigueur en juin 2022. Cet acte interdit d'importer aux États-Unis des produits extraits, fabriqués ou transformés à partir de travail forcé dans le Xinjiang. Le Xinjiang est connu pour le coton qu'il fournit mondialement à l'industrie textile, mais il produit également la moitié du polysilicium destiné au photovoltaïque mondial. Les industries américaines de l'énergie solaire ont aussitôt pris des mesures pour relocaliser leurs approvisionnements et en assurer la traçabilité, y voyant une occasion de stimuler la production aux États-Unis.

Les initiatives des entreprises en matière de responsabilité sociale et environnementale (RSE) sur les métaux de la transition bas-carbone constituent également un volet important dans la réponse à ces risques environnementaux et sociaux dans les années à venir. À titre illustratif, le groupe Volkswagen a mis en place un système de gestion de diligence raisonnée sur ce sujet et produit depuis deux ans un rapport annuel sur son approvisionnement responsable en ressources minérales (encadré 6).

Le sujet de la RSE en matière d'approvisionnement en matières minérales et d'extraction minière (« mine responsable ») est également source d'initiatives au niveau des entreprises et des États, qui développent des exigences vis-à-vis des entreprises : obligation de recueillir des informations, de transparence, institution du devoir de vigilance¹⁵³. La France a été pionnière dans ce domaine avec la loi de 2017 sur le devoir de vigilance. L'Union européenne développe différentes

¹⁵² www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/audit/Deloitte-SCDDA-implementation-companies-EN.pdf.

¹⁵³ Par exemple, les États-Unis ont intégré en 2012 des règles relatives à la transparence sur les « minerais de conflits » dans le Dodd Frank Act.

réglementations en matière de politique commerciale (règlement 3TG) et du marché intérieur (réglementations « produits », par exemple pour les batteries). Sur le plan international, plusieurs initiatives jouent un rôle structurant, sous l'égide de l'OCDE (guides sur la conduite responsable des entreprises et sur l'approvisionnement responsable en minerais issus de zones de conflit et à haut risque¹⁵⁴), de la Commission économique pour l'Europe des Nations unies (UNECE), sur la gestion durable des ressources ou pour la transparence des industries extractives (ITIE). De nouvelles initiatives internationales sur la mine responsable sont en train de voir le jour au sein de l'Agence internationale de l'énergie, du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). En parallèle, la France a rejoint le « Partenariat stratégique pour les matières premières » (MSP) initié par les États-Unis en 2022 dans le but de sécuriser les approvisionnements de ses États partenaires (11 États ainsi que la Commission européenne) en limitant la monopolisation des projets miniers par la Chine, notamment en Afrique. Une déclaration sur la mine responsable a été publiée lors du dernier salon minier sud-africain. Elle rappelle les attentes des membres du MSP quant aux critères environnementaux, sociaux et de gouvernance attendus afin d'accompagner les pays tiers. La France soutient également le lancement d'une « Coalition pour des minéraux critiques durables » lancée par le Canada lors de la COP15. Enfin, les entreprises ont produit un nombre important de référentiels ou de labels, d'une grande variété mais de qualité inégale : les principes du Conseil international de la mine et des métaux (ICMM), *Towards sustainable mining (TSM)* et *TSM Finland, Initiative for responsible mining assurance (IRMA), Fairmined, Responsible minerals initiative (RMI)*.

Encadré 6 : le rapport annuel de Volkswagen sur l'approvisionnement responsable en ressources minérales

Depuis 2021, l'entreprise Volkswagen publie un rapport annuel sur ses initiatives et activités en matière d'approvisionnement responsable. Le groupe a mis en place un système de gestion des impacts liés à l'approvisionnement en ressources minérales, avec un triple objectif de les identifier, les évaluer et les réduire. Volkswagen s'inspire pour cela du cadre développé par l'OCDE (*OECD Due Diligence Guidance for Responsible Sourcing from Conflict-Affected and High-Risk Areas*).

Étant données la complexité et la profondeur des chaînes de valeur concernées (allant jusqu'à neuf niveaux de fourniture en remontant la chaîne), Volkswagen a dans un premier temps considéré qu'il était nécessaire de concentrer ses efforts sur les métaux les plus à risque. Au total, 16 métaux et matières ont été retenus dans l'analyse, regroupés en trois catégories : métaux de batteries (lithium, cobalt, nickel, graphite) ; minerais de conflits (3TG) - (étain, tantale, tungstène, or) ; et autres métaux et matières (aluminium, cuivre, platinoïdes, acier, terres rares, mica, cuir, caoutchouc).

Huit types de risques sont considérés : travail des enfants, esclavage, risques sur les droits de l'Homme, abus sur les droits de l'Homme commis par des forces de sécurité publiques ou privées, soutien direct ou indirect à des groupes armés, risques sur la sécurité et la santé des travailleurs, impacts négatifs sur l'environnement, non-respect du droit du travail, discrimination et harcèlement, notamment à l'égard de groupes vulnérables, et menaces sur les communautés locales.

Si l'on prend l'exemple du cobalt, le rapport montre ainsi que, selon le résultat d'un audit conduit en 2021, 200 fournisseurs ont pu être identifiés, et que 50 % d'entre eux ont fait l'objet d'un plan d'action corrective (*Corrective Action Plan*). En outre, depuis 2020, les contrats d'approvisionnement entre Volkswagen et ses fournisseurs de batteries doivent obligatoirement fournir des informations relatives aux mines d'où sont issues les ressources minérales. Enfin, en 2021, le groupe Volkswagen s'est engagé dans *Cobalt for Development* (« C4D »), un projet de terrain en République démocratique du Congo.

¹⁵⁴ <https://www.oecd.org/fr/daf/inv/mne/Guide-OCDE-Devoir-Diligence-Minerais-%20Edition3.pdf>

POINTS ESSENTIELS

- Les risques environnementaux peuvent remettre en question la capacité à produire. Ces risques recouvrent la pollution, le manque de ressources nécessaires (eau, énergie, etc.) et la vulnérabilité des sites aux conditions climatiques (sécheresse, montée des eaux, déstabilisation des sols, etc.).
- Les risques sociaux, souvent liés aux risques environnementaux, incluent les grèves, les oppositions de populations locales aux projets industriels et, *in fine*, à travers la négation des droits humains et du droit du travail, les risques de réputation et de boycott.
- Ces risques sont en interaction avec les risques politiques, comme illustré par les différents mouvements de grève de mineurs au Chili, les perturbations dans les mines péruviennes, notamment de cuivre, et par le conflit d'usage de la ressource en eau entre les populations locales et les industries extractives.

III.

Politiques publiques et recommandations

A. Les politiques françaises et européennes

1. LES POLITIQUES FRANÇAISES

Les risques d'approvisionnement, inhérents à la désindustrialisation des territoires et à la fragmentation toujours plus marquée des processus de production, ont un impact direct sur la souveraineté, la défense et les secteurs stratégiques de l'économie française. La question du rôle de l'État dans l'identification des vulnérabilités et la sécurisation des approvisionnements reste essentielle dans une quête d'autonomie stratégique motivée par des besoins en ressources minérales croissants et une montée des tensions géopolitiques. Depuis plusieurs années, une politique de sécurisation des approvisionnements s'est mise en place au gré des nombreuses crises mobilisant industriels et administrations, la dernière en date étant celle des semi-conducteurs.

La stratégie française de sécurisation repose sur l'élaboration de documents d'orientation, une veille renforcée, une planification des besoins fondée sur l'étude des scénarios de développement des technologies de la transition énergétique, et la considération des ressources que pourrait fournir le territoire national. De plus, un soutien à la production industrielle primaire et secondaire de métaux critiques et le déploiement d'une « diplomatie des métaux » à l'international sont à développer.

En 2015, via la loi sur la transition écologique et la croissance verte, l'État a souhaité élaborer des plans de programmation afin d'être en capacité de mieux anticiper les besoins futurs et mieux prendre en compte les besoins de l'industrie. La publication en 2018 du Plan ressources pour la France¹⁵⁵ a précédé les travaux aboutissant à ce rapport et préparant le futur plan de programmation des ressources minérales de la transition bas-carbone.

En complément de la planification, la veille permet d'acquérir des connaissances sur les substances, leur origine, les acteurs, les États et les filières aval, et d'identifier les paramètres critiques des chaînes de valeurs (technologiques, géopolitiques, environnementaux, etc.) afin d'anticiper les risques. Le Comité pour les métaux stratégiques¹⁵⁶ (Comes), créé en 2011 pour mener ces actions, est une instance de concertation entre acteurs français, ainsi qu'une plateforme d'échanges entre producteurs et utilisateurs. Enfin, l'État s'appuie sur l'expertise d'opérateurs institutionnels, majoritairement des établissements publics, tels que le BRGM, l'Ifremer, le CEA et l'Ademe.

Pour renforcer cette veille, les recommandations de la mission Varin¹⁵⁷ (janvier 2022), axées prioritairement sur les métaux des batteries et des aimants permanents, ont notamment permis la création de l'Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (Ofremi) en novembre 2022. Celui-ci a pour vocation de fournir aux filières industrielles françaises une veille permanente, prospective, collaborative et pérenne sur les chaînes de valeurs. Une équipe dédiée du BRGM s'appuie sur le CEA, l'Ifpen, l'Ademe, l'IFRI et le CNAM afin d'assurer cette veille et de mener des analyses sur les chaînes de valeurs minérales, de l'extraction à la première transformation, par l'analyse des usages et de l'évolution de la demande en matières des filières aval. L'Observatoire a également pour objectif d'analyser les vulnérabilités des chaînes de valeur sur l'ensemble du cycle de vie des produits. Les travaux commenceront sur un périmètre restreint de substances et produits contenant des métaux stratégiques : titane, lithium, cuivre et batteries (à base de lithium, cobalt, nickel, manganèse, graphite).

¹⁵⁵ Le Plan ressources pour la France a été rédigé en réponse à l'article 69 de la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.

¹⁵⁶ Décret du 24 janvier 2011 portant sur la création du comité pour les métaux stratégiques (Comes).

¹⁵⁷ Pour plus de détails : <https://www.ecologie.gouv.fr/investir-dans-france-2030/remise-au-gouvernement-du-rapport-varin-sur-securisation>

En matière de ressources minérales, afin de s'assurer de la pérennité des sites extractifs et métallurgiques, le service de l'information stratégique et de la sécurité économique (SISSE), rattaché à la Direction générale des entreprises (DGE) et créé en 2016, alerte les autorités compétentes en cas de tentative de prédateur étrangère et peut s'opposer à des rachats d'entreprises dans des secteurs jugés stratégiques. La réforme du code minier, engagée par la loi Climat et Résilience¹⁵⁸ et finalisée en 2022¹⁵⁹, permet de mettre en place une politique nationale des ressources et des usages du sous-sol pour une gestion minière durable et responsable, liée à une stratégie de valorisation des ressources minérales locales. L'identification des ressources du territoire et des risques associés via des campagnes géophysiques¹⁶⁰, permettra de recueillir de nouvelles données permettant une meilleure connaissance du sous-sol.

L'État a également mobilisé en faveur de la réindustrialisation des dispositifs d'aides complémentaires permettant d'accompagner le développement de projets à tous les niveaux de maturité technologique (*technology readiness level, TRL*) jusqu'à leur industrialisation :

- Les stratégies d'accélération portées par le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI), dont certaines dédiées aux batteries et au recyclage ou le PEPR (programme et équipements prioritaires de la recherche), un programme étant dédié au sous-sol.
- Le plan de relance, à travers l'appel à projet « résilience » qui a permis de financer environ 550 millions d'euros d'investissement pour 110 millions d'euros de soutien public.
- Le plan d'investissement France 2030, d'une enveloppe d'un milliard d'euros. Différents appels à projets (AAP) et à manifestation d'intérêt (AMI) ciblant les métaux critiques ont été ouverts dès 2022 : AAP « métaux critiques », AAP « I-démo », AAP « solutions innovantes pour l'amélioration de la recyclabilité, le recyclage et la réincorporation des matériaux (RRR) » et AMI « intrants dépendance russe, biélorusse et ukrainienne », visant à réduire la dépendance aux importations de métaux critiques de l'industrie française.

Complément essentiel du soutien industriel, le développement de compétences est un enjeu majeur. Pour accélérer l'adaptation des formations aux besoins des nouvelles filières et des métiers d'avenir, l'Agence nationale de la recherche (ANR) a lancé un AMI « compétences et métiers d'avenir » pour répondre aux besoins des entreprises en matière de formation et de compétences nouvelles.

Sur le plan de l'action de la France à l'international, une « diplomatie des métaux » permettra de négocier des partenariats stratégiques avec des pays partageant une vision commune, afin de renforcer l'intégration de la diplomatie des métaux dans les initiatives et stratégies existantes prioritairement portées par la France¹⁶¹. Elle pourra être à l'origine d'initiatives européennes ou internationales à l'instar du *Mineral Security Partnership* (MSP), annoncé en juin 2022 à Toronto. L'objectif du MSP est d'assurer l'exploitation et le traitement responsable de matières premières critiques pour répondre aux enjeux de sécurisation des approvisionnements.

Enfin, afin d'assurer de la cohérence d'ensemble, un délégué interministériel aux approvisionnements en métaux stratégiques a été nommé en décembre 2022 pour coordonner l'action des différentes directions d'administration centrale contribuant à la sécurisation des approvisionnements, ainsi que pour apporter des réponses à l'ensemble des enjeux et conforter les approches déployées par l'État sur le plan européen et international. Le délégué interministériel préside en outre le comité stratégique de l'Ofremi.

¹⁵⁸ Loi du 22 août 2021 portant sur la lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets.

¹⁵⁹ <https://www.economie.gouv.fr/daj/le-code-minier-partie-legislative-finalise-par-une-ordonnance-du-10-novembre-2022>

¹⁶⁰ Mandaté par le ministère de la Transition écologique, le BRGM mène depuis juin 2021 une campagne de géophysique aéroportée sur le Massif central.

¹⁶¹ On peut à cet égard citer la relance du projet d'Eramet sur le lithium en partenariat avec la Chine.

2. LES POLITIQUES EUROPÉENNES

En 2008, la Commission européenne a adopté la *Raw Material Initiative*, première stratégie européenne visant à réduire la dépendance en matières premières non-énergétiques des chaînes de valeur industrielles. Cette stratégie a été révisée en 2020 lors de l'adoption du *Critical raw materials action plan*, qui ambitionne de développer des chaînes de valeurs résilientes pour les écosystèmes industriels de l'UE, d'inciter à l'utilisation circulaire de la ressource et à l'innovation, favoriser un approvisionnement durable et diversifié, ainsi que de renforcer et développer l'approvisionnement domestique. Cette stratégie s'articule avec le Pacte vert, le *European Innovation Partnership* (EIP) ou la Stratégie industrielle pour l'Europe, qui reposent sur six grands axes :

Structurer les chaînes de valeurs via le développement d'écosystèmes européens compétitifs et durables. L'Alliance européenne pour les matières premières (ERMA), et la *European Battery Alliance* (EBA) sont des dispositifs visant à réunir les parties prenantes concernées (acteurs industriels, États membres, syndicats, société civile, instituts de recherche et de développement, investisseurs, ONG, etc.), afin d'identifier les obstacles, les opportunités et les projets d'investissement pour la production de matières de l'extraction au recyclage.

Réguler et réglementer afin de débloquer les goulets d'étranglement réglementaires et fournir des solutions adaptées aux besoins de l'industrie. Des actions législatives européennes sont envisageables, y compris sur des produits spécifiques :

- Le devoir de diligence sur les minerais de conflits (étain, tantale, tungstène et or), adopté par l'Union dès 2017, il se limite à certains risques, principalement relatifs aux droits humains et à la gouvernance, sans pleinement intégrer les aspects relatifs aux enjeux sociaux et environnementaux.
- Le règlement européen sur les batteries qui devrait être adopté par le Parlement européen en 2023, intègre des obligations relatives à la prise en compte du bilan carbone, à des objectifs de collecte et de recyclage, à la réintégration de matières premières recyclées ou au « devoir de vigilance » qui intègre les enjeux environnementaux, sociaux et de gouvernance sur les matières premières utilisées dans les batteries avec l'obligation de connaître le pays où ces matières sont extraites.

D'autres réglementations portent sur le recyclage de certains produits, tels que les déchets électroniques (DEEE) et les véhicules usagés (VHU). En parallèle, certaines réglementations dites « transversales » peuvent être mobilisées :

- Le projet de directive sur le devoir de diligence des entreprises, inspirée de la loi française de 2017, étendrait les obligations de devoir de diligence aux plus grands acteurs économiques, mais avec moins de précisions sur les informations à recueillir sur les matières premières que pour les minerais de conflits ou les batteries.
- Le règlement dit « taxonomie » sur les investissements durables, à condition de réussir à en définir les critères, valoriserait les meilleures pratiques et les meilleurs projets extractifs.
- Le règlement sur le transfert international de déchets, en cours de révision, éviterait l'exportation de déchets vers des pays où leur traitement ne serait pas comparable au traitement des pays communautaires.

Développer des partenariats stratégiques internationaux afin de garantir un approvisionnement diversifié de matières premières critiques durables. Le premier partenariat pilote a été lancé en 2021 avec le Canada et il est ouvert à tous pays intéressés voisins de l'UE et d'Afrique. Un second partenariat stratégique a été lancé avec l'Ukraine sur les matières premières et les batteries à la suite de la signature d'un protocole d'accord en juillet 2021.

Financer la recherche, le développement et l'innovation à travers une offre qui couvre la recherche fondamentale, les problématiques prioritaires, l'innovation et le transfert de technologie. Horizon Europe est le programme cadre européen pour la recherche et l'innovation sur la période 2021 à 2027 et dispose d'un budget total de 94 milliards d'euros. Il comprend des offres distinctes de financement pour les instituts de recherche et pour les entreprises, ces dernières bénéficiant des subventions, des prises de participations, pour des projets individuels ou s'inscrivant dans une collaboration. Parallèlement, la Commission s'est armée d'un organisme européen le *European*

Institute of Innovation & Technology (EIT) dans le but de renforcer la capacité d'innovation par la coopération entre l'industrie et les organismes d'enseignement.

Promouvoir l'innovation dans les domaines industriels stratégiques d'avenir. Le Projet important d'intérêt européen commun (PIIEC) autorise les États membres à financer des initiatives industrielles au-delà des limites habituelles de la réglementation européenne en matière d'aide d'État. Les opérateurs économiques participants doivent démontrer l'intérêt d'un projet et la volonté de coopérer avec d'autres leaders européens dans le but de développer l'ensemble de la chaîne de valeur européenne. Quatre initiatives ont officiellement obtenu le statut de PIIEC, deux d'entre elles destinées à la chaîne de la valeur des batteries, la troisième aux semi-conducteurs et la micro-électronique, la dernière au secteur de l'hydrogène.

Soutenir le partage d'information en capitalisant sur les compétences du réseau d'experts SCRREEN sur les matières premières critiques. Le Raw Material Information System (RMIS), portail informatique du Joint Research Center (JRC) permet d'accéder à l'essentiel des travaux et des résultats de ces dernières années sur le thème des matières premières. On y retrouve notamment les listes de criticité, des dossiers techniques sur les effets du conflit russe-ukrainien sur la sécurité d'approvisionnement, des analyses liées à la production et au commerce de matières premières ainsi que des fiches pays et substances.

En mars 2023, la Commission européenne a publié sa proposition d'Acte européen sur les matières premières critiques visant à réduire la dépendance vis-à-vis des pays tiers, à renforcer les chaînes de valeur et à réduire les vulnérabilités sur les chaînes d'approvisionnement européennes en métaux critiques. Cet Acte européen s'articule autour de grandes thématiques : le renforcement des chaînes de valeur par l'accompagnement des projets stratégiques et l'accélération des autorisations pour le déploiement de projets miniers ; l'atténuation des risques d'approvisionnement par une veille prospective et une coordination des stocks stratégiques ; le développement du recyclage et l'homologation des certifications RSE. La proposition de la Commission ne prévoit pas de nouveaux guichets de financement ni de mesures sur la recherche et développement.

Un *Critical Raw material board* sera mis en place pour suivre la mise en place des dispositions de ce règlement. Il sera présidé par la Commission et composé de représentants des États membres. Le texte fait référence à plusieurs actes délégués et actes d'exécution qui viendront préciser certaines dispositions.

B. Recommandations

1. VISION, OBJECTIFS ET LEVIERS

a) Enjeux

Plusieurs constats guident les recommandations présentées ci-après.

Le premier est celui des multiples dimensions en interaction qui impactent les chaînes de valeur mondiales – facteurs géologiques, technologiques, géopolitiques, diplomatiques, économiques, financiers, environnementaux et sociaux. Ceci explique la diversité des acteurs publics (ministères en charge de l'environnement, de l'économie et de l'industrie, des armées, des affaires étrangères, du commerce extérieur, corps d'inspection, services du Premier ministre, etc.), parapublics (BRGM, CEA, ANR, Ademe, Ifpen, RTE, Bpifrance, OSFME, etc.) et entreprises privées à actionnariat public (comme EDF, Eramet et Orano). Une stratégie d'ensemble est nécessaire afin d'associer les différents acteurs autour d'une action cohérente sur les facteurs de criticité. La mise en place par le décret n°2022-1550 du 10 décembre 2022 de la délégation interministérielle aux approvisionnements en minerais et métaux stratégiques, s'inscrit dans cette perspective. En s'appuyant notamment sur les travaux préparatoires au plan de programmation des ressources, cette délégation définit avec les acteurs ses objectifs structurants et s'assure de leur mise en œuvre. Cette délégation peut s'appuyer sur l'Ofremini pour assurer une veille permanente, prospective, collaborative et pérenne sur les chaînes de valeurs et leurs vulnérabilités.

Le second constat est celui de la complexité des chaînes de valeur étudiées, constituées de multiples acteurs spécialisés et dispersés géographiquement. Cet éclatement demande de connaître les chaînes de valeur, de l'amont minier au recyclage en passant par les étapes intermédiaires de transformation, afin de ne pas risquer de déplacer des vulnérabilités sur des maillons également fragiles, notamment au regard de la maîtrise des technologies et des rendements d'échelle. Le niveau européen est le niveau pertinent pour bénéficier des spécialisations nationales et avoir accès à un ensemble de technologies, compétences, ressources et débouchés pour les entreprises.

b) Objectifs

Un premier enjeu est celui de l'explicitation et de la mise en visibilité des objectifs poursuivis afin de sécuriser les approvisionnements en matériaux et composants nécessaires à la transition bas-carbone.

Un objectif défensif prioritaire serait, **à partir de 2030, de fixer un objectif ambitieux en matière de développement de chaînes de valeur européennes autonomes pour les technologies jugées les plus stratégiques, afin de couvrir une part significative de la demande européenne¹⁶²**. Une chaîne de valeur est autonome si, sur chacune de ses étapes, des acteurs européens sont seuls décideurs et disposent de toutes les ressources nécessaires à la production. Le cadre communautaire facilite la mobilisation d'instruments de politiques économiques et commerciales, des mesures relatives aux marchés publics ou des aides à l'investissement et à la R&D.

La fixation d'un tel objectif prend en compte plusieurs paramètres :

- Un horizon fixé à 2030 correspond à la commande des présents travaux et permet de bénéficier d'une relative visibilité, sur les plans technologique, énergétique et géopolitique ;
- Le pourcentage de la demande couverte par une production européenne devrait éviter un blocage complet des économies européennes et limiter les conséquences d'une crise d'approvisionnement internationale sur plusieurs semaines. Il devrait être suffisamment élevé pour favoriser l'émergence d'industries bénéficiant d'économies d'échelle et le développement de filières au niveau européen ;
- Le pourcentage fixé devrait correspondre aux capacités industrielles européennes et aux ressources disponibles. Cette limite permettrait de conserver les avantages du commerce international liés aux avantages comparatifs et à la diffusion de l'innovation.

¹⁶² À cet égard, la Commission européenne a présenté en mars 2023 le projet de règlement sur les matières premières critiques, qui vise notamment à définir une liste de matières premières stratégiques, et des objectifs-cibles de capacités européennes d'approvisionnement à l'horizon 2030 : au moins 10 % de la consommation annuelle de l'UE pour l'extraction, au moins 40 % pour la transformation, et au moins 15 % pour le recyclage. Par ailleurs, l'UE ne devrait pas dépendre à plus de 70 % d'un seul pays tiers pour sa consommation annuelle de chaque matière première stratégique à n'importe quel stade pertinent de la transformation (enjeu de diversification des approvisionnements).

L'objectif est circonscrit aux filières les plus stratégiques. Trois filières étudiées semblent de bonnes cibles, pour différentes raisons :

- Les batteries pour la mobilité bas-carbone, en raison de la nécessité de la décarbonation du secteur du transport (principal secteur émetteur de GES en France) et de l'importance de l'industrie automobile en Europe et en France¹⁶³, supérieure aux autres filières étudiées. Cet enjeu est particulièrement fort car les batteries Li-ion sont, au moins jusqu'à moyen terme, irremplaçables et que des innovations majeures ne seront pas disponibles avant longtemps.
- Les aimants permanents des moteurs électriques et des génératrices d'éoliennes, en particulier offshore. La chaîne de valeur des aimants permanents apparaît comme l'une des plus vulnérables en raison de l'hégémonie des acteurs chinois et du manque de transparence des marchés de niche qui la constituent. Les aimants sont par ailleurs nécessaires dans d'autres filières (électronique, défense, robotique, pompes à chaleur et climatisation, etc.), même si la mobilité électrique reste le principal contributeur à la hausse de la demande ;
- Enfin, certains métaux constituent un enjeu stratégique dans la mesure où ils sont communs à de multiples filières, tout particulièrement le cuivre.

Un objectif secondaire, offensif cette fois, pourrait être de **faire émerger des acteurs européens capables de prendre des parts de marché substantielles au niveau mondial sur certains maillons des chaînes de valeurs internationales, afin de créer des relations d'interdépendance, et non pas uniquement de dépendance avec les partenaires commerciaux extra-européens**. Cet objectif est donc celui d'une spécialisation axée sur des avantages comparatifs, et non pas seulement sur des choix stratégiques, pour bénéficier des gains du commerce international. La bonne connaissance des marchés et des entreprises est donc nécessaire avant de mieux expliciter un tel objectif, qui inclurait la part de marché agrégée des acteurs européens au niveau mondial sur un segment bien délimité. Le ciblage, nécessairement fin, de tels segments et acteurs doit également être réalisé au niveau européen car les éventuelles politiques de soutien (droits de douanes, aides à la R&D et à l'investissement, etc.) dépendent du cadre communautaire.

À plus long terme, à partir des années 2030, de tels objectifs prioritaires et secondaires pourraient concerner le solaire photovoltaïque¹⁶⁴ (à base de cellules pérovskites lorsque ces technologies seront validées à l'échelle industrielle), l'hydrogène voire le nucléaire et l'électronique.

c) Leviers et axes d'action

Plusieurs leviers devront être actionnés en cohérence tant du côté de l'offre que de la demande en ressources minérales afin de répondre à ces objectifs.

La demande sur les marchés finaux étudiés dans le cadre de nos travaux dépend fortement de l'État, qui doit donc être en mesure de la maîtriser sans ralentir la transition bas-carbone. Un premier moyen d'action est celui de la commande publique. Les règles d'achats doivent inclure la prise en compte de paramètres autres que les coûts, comme les impacts environnementaux des achats et les vulnérabilités des chaînes d'approvisionnement. Ces dernières sont déterminantes dans la capacité des candidats à des marchés publics à répondre au besoin de l'acheteur. Au-delà de la commande publique, le déploiement de nombreuses technologies est planifié (programmation pluriannuelle de l'énergie, stratégie nationale bas-carbone, etc.) et passe par des appels d'offres (AO), dont les conditions et critères sont fixés par les pouvoirs publics. Pour d'autres technologies, comme la mobilité bas-carbone, l'État intervient par des réglementations et dispositifs fiscaux incitatifs. Enfin, des organismes parapublics ou des entreprises aux capitaux publics représentent une part importante de la demande, comme EDF et Engie dans la production électrique ou RTE et Enedis pour les réseaux électriques. **L'État dispose ainsi de plusieurs canaux (marchés publics, réglementation, plans de programmation, appels d'offres, entreprises contrôlées et instruments fiscaux) pour orienter la demande.** Ce constat est le même au niveau européen et dans la plupart des pays d'Europe.

¹⁶³ 16 % des revenus de l'industrie manufacturière en France, voir notamment Head, K., Martin, P. & Mayer, T. (2020) *Les défis du secteur automobile : compétitivité, tensions commerciales et relocalisation*. Notes du conseil d'analyse économique, 58, 1-12. <https://doi.org/10.3917/ncae.058.0001>.

¹⁶⁴ À ce titre, on peut citer la contribution du CEA à la stratégie européenne pour le solaire.

La demande en produits intermédiaires et finaux est dépendante des choix des consommateurs (administrations, entreprises et ménages), souvent insuffisamment informés des enjeux relatifs aux ressources minérales, aussi bien économiques qu'environnementaux et sociaux. **L'efficacité des actions relatives à la sécurisation des approvisionnements dépend de la sensibilisation des acteurs, ce qui nécessite la collecte et la diffusion d'informations sur le contenu matière des technologies, la provenance et le bilan environnemental des composants utilisés.**

Trois grandes étapes des chaînes de valeur constituent l'offre en ressources minérales : l'extraction, la transformation et le recyclage.

L'extraction de matières premières est une activité réglementée et dépendante des États. Plusieurs entreprises minières européennes sont à capitaux publics et pourraient s'inscrire dans des stratégies impulsées par les pouvoirs publics :

- Orano (capital détenu à 90 % par l'État français, qui est associé à un projet de recyclage des batteries lithium-ion en France¹⁶⁵ et également à un projet de recyclage des aimants permanents¹⁶⁶) ;
- Eramet (actif historiquement dans l'extraction et la transformation du manganèse, du nickel, du cobalt et plus récemment dans l'extraction de lithium) ;
- *Finnish Minerals Group* (détenu à 100 % par l'État finlandais et actif en Finlande sur l'extraction et la transformation des minéraux nécessaires aux batteries Li-ion, à travers des participations majoritaires dans des projets miniers) ;
- KGHM (détenu à plus de 30 % par l'État polonais et extracteur de nombreux métaux évoqués dans les présents travaux comme le cuivre, les platinoïdes, le nickel, etc.).

Au-delà de l'Union européenne, de nombreuses entreprises minières sont détenues au moins en partie par des États, tant en Chine qu'en Amérique du Sud (au Chili, Codelco pour le cuivre et SQM pour le lithium) et en Afrique (Cominière en République démocratique du Congo).

Les potentiels leviers d'action pour les pouvoirs publics sur cette étape de l'extraction sont donc la réglementation, ainsi que la mobilisation stratégique d'entreprises à capitaux publics et la diplomatie.

Les premières étapes du recyclage sont la collecte et le premier tri des déchets¹⁶⁷. Ces étapes sont réalisées par un ensemble diffus d'entreprises, souvent de petite taille. Néanmoins des éco-organismes structurent les acteurs du recyclage de certaines filières. **L'État peut donc intervenir sur ces étapes à travers la réglementation (création de filières REP, obligations de recyclage, objectifs environnementaux) et un soutien financier (aides à la R&D, à l'investissement voire aux énergo-intensifs) pour les filières jugées prioritaires.** Les étapes suivantes du recyclage rejoignent en partie les traitements et procédés des transformations intermédiaires, qui incluent chimie et métallurgie.

Les étapes de transformation intermédiaires sont les plus complexes, en raison de la diversité des acteurs impliqués et de leur spécialisation. Ces étapes apparaissent comme les plus critiques, car elles font apparaître les concentrations les plus marquées tant sur le plan géographique qu'industriel, et nécessitent des technologies et compétences spécialisées. De plus, la fragmentation sur ces étapes rend difficile la traçabilité des matières premières (et donc la connaissance et la limitation des impacts sociaux et environnementaux de leur exploitation) et l'identification des vulnérabilités d'approvisionnements, y compris pour les entreprises concernées. **Le premier enjeu est donc celui de la connaissance des entreprises, de leurs consommations et besoins en ressources minérales sur ces étapes des chaînes de valeur.** L'action des pouvoirs publics passe par des incitations à la réindustrialisation, ici justifiée par la défense d'une autonomie stratégique. Les industries concernées sont particulièrement capitalistiques, très technologiques et présentent des économies d'échelle qui donnent des avantages aux

¹⁶⁵ <https://www.orano.group/fr/l-expertise-nucleaire/valorisation-des-metaux-strategiques/recyclage-des-batteries-electriques-orano-lance-un-pilote-industriel>

¹⁶⁶ <https://www.teneridis.fr/fr/projets/magnolia-magnets-on-pilot-line-ambition/>

¹⁶⁷ Un enjeu majeur sera ici de lutter contre l'exportation de nos batteries et moteurs usagés pour conserver la matière en France ou en Europe.

installations de grandes capacités. Ces étapes sont les plus ouvertes à la concurrence internationale. **Les instruments mobilisables par les États sont donc financiers (pour faciliter les investissements, par exemple avec des PIIEC, et contribuer à couvrir des coûts importants, notamment énergétiques) : aides à la R&D et à la modernisation des usines, ainsi que la politique commerciale.**

Les recommandations sont proposées selon quatre axes : la sobriété (maîtrise de la demande), l'évaluation du risque d'approvisionnement sur les métaux, le développement industriel et la réduction des impacts environnementaux et sociaux.

2. RECOMMANDATIONS TRANSVERSALES

AXE 1 - MAÎTRISER LA DEMANDE ET RENFORCER LA SOBRIÉTÉ

La maîtrise de la demande et la sobriété constituent le premier volet de la transition bas-carbone. L'objectif est de repenser les modes de consommation sans réduire le niveau de services rendus aux usagers et aux consommateurs. À cet égard, la *low-tech* peut permettre de conserver des usages tout en réduisant leur empreinte métal, énergie, etc.

Maîtriser la demande s'adresse aussi bien aux entreprises qu'aux particuliers et aux administrations. Il s'agit de sensibiliser tous ces acteurs aux enjeux liés à la consommation de ressources minérales, et de leur montrer comment réduire leur consommation à travers leurs achats et/ou leurs investissements.

La *low-tech* constitue une piste complémentaire, car, en cherchant des voies différentes de la *high-tech*, elle intègre directement dans le produit l'objectif d'une moindre utilisation de métaux. Pour favoriser son déploiement, il s'agirait : d'une part, de mettre en contact l'écosystème *low-tech* de l'Ademe avec les industriels et les chercheurs du secteur des ressources minérales intéressés par la problématique *low-tech* afin d'identifier des pistes de recherche et d'action et d'autre part de lancer des AMI ou des AAP sur des innovations *low-tech* et sur l'écoconception permettant de réduire l'utilisation de métaux stratégiques.

Enfin, la sobriété ne concerne pas que les biens et services individuels : l'investissement dans les infrastructures collectives peut conduire à diminuer fortement la consommation globale des ressources en réduisant le besoin d'investissements chez les particuliers. C'est par exemple le cas de la route électrique, qui peut diminuer par trois le besoin en batteries pour l'ensemble des véhicules.

Recommandation 1

Demande des entreprises : mettre en place, pour les syndicats professionnels, des formations permettant aux entreprises d'acquérir la connaissance sur leur approvisionnement en métaux et leur empreinte matière, en s'appuyant le cas échéant sur les travaux de l'Ofremi, et de procéder à un auto-diagnostic de leurs pratiques.

Demande des particuliers : réglementer (standardisation des chargeurs, etc.), inciter (meilleures aides à l'achat de voitures petites ou peu sophistiquées) ; encourager (labels, action des ONG, etc.) à la baisse des consommations les plus impactantes.

Demande des administrations : faire mettre en place par les ministères et établissements publics un plan d'actions pour connaître et optimiser leur consommation de ressources minérales (travailler sur les empreintes matières à l'instar des empreintes carbone) ; commencer par les organisations les plus consommatrices.

Low-tech : inclure la low-tech et les innovations permettant la sobriété dans les dispositifs de soutien à la recherche et l'innovation ; favoriser le déploiement de la production de chaleur, qui constitue une alternative aux énergies fossiles et qui est peu consommatrice de métaux (incitations financières et fiscales).

AXE 2 - RENFORCER L'ÉVALUATION DES RISQUES D'APPROVISIONNEMENT LIÉS AUX RESSOURCES MINÉRALES POUR LES TECHNOLOGIES DE LA TRANSITION BAS-CARBONE / VERS UNE ÉVALUATION DES RESSOURCES MINÉRALES DE LA PPE ET LA SNBC

La forte dépendance aux importations des filières de la transition bas-carbone fait peser des risques sur la capacité à mener à bien la transition énergétique en France et en Europe. Les besoins en métaux de cette filière doivent donc être évalués au regard de ses vulnérabilités d'approvisionnement.

Ceci s'applique en tout premier lieu à la **stratégie française sur l'énergie et le climat (SFEC)**, qui sera notamment constituée de la première loi de programmation quinquennale sur l'énergie et le climat (dont l'adoption est prévue en 2023), de la **programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)** et de la **stratégie nationale bas-carbone (SNBC)**, qui doivent être révisées en 2024. Ces évaluations pourront permettre de mettre en cohérence les politiques publiques avec le prochain plan de programmation des ressources minérales de la transition bas-carbone. Elles pourront être réalisées par l'Ofremi notamment pour la filière des batteries pour la mobilité. La publication de ces évaluations sera un signal fort de l'implication des pouvoirs publics, qui contribuera à la sensibilisation des entreprises et du grand public.

Recommandation 2

Dans le cadre des travaux de la SFEC et de la planification écologique, évaluer les besoins en ressources minérales de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) et de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC).

AXE 2 - RENFORCER L'ÉVALUATION DES RISQUES D'APPROVISIONNEMENT LIÉS AUX RESSOURCES MINÉRALES POUR LES TECHNOLOGIES DE LA TRANSITION BAS-CARBONE / DES CLAUSES RELATIVES AUX RESSOURCES MINÉRALES DANS LES APPELS D'OFFRE

Par ailleurs, il n'est pas possible aujourd'hui, à travers les réponses aux appels d'offres et aux marchés publics relatifs au déploiement de la transition énergétique, de connaître avec précision les technologies employées ni les besoins en métaux, notamment stratégiques. Ceci rend difficile la connaissance de la demande en ressources minérales, ainsi que l'évaluation des stocks qui seront recyclables.

Dès lors, il serait souhaitable que les cahiers des charges des appels d'offres et marchés publics relatifs au déploiement de technologies bas-carbone comprennent des clauses relatives à la communication des bilans matières des composants. Il s'agit des appels d'offres et marchés publics relatifs aux énergies renouvelables (solaire, éolien à terre et en mer, énergies marines, etc.), aux réseaux électriques (concessions, marchés des gestionnaires de réseaux de transport et de distribution) et à la mobilité (flottes de véhicules des administrations et des entreprises publiques, des organismes parapublics, marchés de fourniture de matériel de transport lourd, etc.). Ces clauses auraient pour objet d'informer les autorités administratives et le public des ressources utilisées. Ces informations seraient mises à disposition des services d'études et observatoires chargés d'évaluer la demande et les politiques publiques consommatrices de ressources minérales. En pratique, de telles clauses pourraient transposer l'évaluation du contenu local des projets, ce qui existe déjà pour certains appels d'offres dédiés aux énergies renouvelables¹⁶⁸.

Dans un second temps, afin de permettre une maîtrise de la demande en métaux, il serait nécessaire, **au niveau européen, de généraliser l'information sur les matières contenues dans les technologies de la transition bas-carbone par un passeport matière**, qui permettra notamment la traçabilité des composants et matières utilisés, par exemple sur le modèle du passeport batteries¹⁶⁹.

¹⁶⁸ Voir par exemple pour l'éolien en mer le paragraphe 6.10.7 *Évaluation du contenu local du projet du cahier des charges du dialogue concurrentiel* n° 1/2020, disponible sur le site de la CRE. Pour l'éolien terrestre et le photovoltaïque, une trame relative au contenu local existe en annexe des cahiers des charges publiés depuis 2020.

¹⁶⁹ Introduit dans le *projet de règlement batteries*.

Les travaux préparatoires à la mise en place d'un tel passeport matière bénéficieront des premiers retours d'expérience de l'intégration des clauses dans les cahiers des charges. Ces travaux incluront la participation aux travaux européens afférents, y compris le règlement européen sur l'écoconception présenté par la Commission européenne en mars 2022, qui succède à la directive de 2009, et qui comporte un volet relatif à l'information des consommateurs, et à la création d'un passeport numérique facilitant la réparation et le recyclage.

Recommandation 3

Intégrer dans les cahiers des charges des appels d'offres et marchés publics relatifs au déploiement de technologies bas-carbone des clauses relatives à la communication des bilans matières des composants utilisés.

Au niveau européen, généraliser l'information sur les matières contenues dans les technologies de la transition bas-carbone par un passeport matière, permettant la traçabilité des composants et matières utilisés.

AXE 2 - RENFORCER L'ÉVALUATION DES RISQUES D'APPROVISIONNEMENT LIÉS AUX RESSOURCES MINÉRALES POUR LES TECHNOLOGIES DE LA TRANSITION BAS-CARBONE / DÉVELOPPER LES CONNAISSANCES ET MOBILISER LES CAPACITÉS D'ANALYSE STRATÉGIQUE ET DE PROSPECTIVE

Le dernier volet de l'axe « évaluation des risques » consiste à développer avec ambition les connaissances et les capacités d'analyse des chaînes de valeur bas-carbone pour éclairer les choix stratégiques, aussi bien en France qu'en Europe. Trois constats, issus des travaux préparatoires au plan de programmation des ressources minérales, inspirent cette recommandation.

Premièrement, ces travaux ont montré que, dans de nombreux domaines, les connaissances restent lacunaires et méritent d'être comblées. La dimension technique et technologique est certes de mieux en mieux appréhendée mais elle ne cesse d'évoluer à un rythme toujours plus rapide. L'analyse économique des chaînes de valeur bas-carbone (formation des prix, différenciations selon la qualité, distorsions de concurrence) fait encore l'objet de diagnostics insuffisants ou contradictoires. Les risques et les vulnérabilités sont difficiles à objectiver et à quantifier pour la décision publique.

Deuxièmement, les travaux du plan ressource ont montré l'intérêt et la pertinence d'adopter une approche systémique et multidisciplinaire. Les chaînes de valeur bas-carbone ne se limitent pas à leurs dimensions technique et économique : elles ont également des implications sur la biodiversité, l'eau, les conditions de travail, l'emploi, le respect des droits de l'Homme dans les pays producteurs de ressources primaires. Une approche systémique ne relève donc pas d'un simple raffinement académique : elle est une condition sine qua non pour prendre les bonnes décisions sur le plan politique.

Troisièmement, les travaux du plan ressources ont mis en exergue le besoin de développer non seulement des diagnostics de la situation actuelle, mais aussi des analyses et des outils de prospective à moyen et long terme. Dans le domaine des chaînes de valeur bas-carbone, et plus particulièrement s'agissant de l'extraction minière, les systèmes de production sont caractérisés par une inertie temporelle forte. Les décisions d'aujourd'hui ne produiront leurs effets que dans dix ou quinze ans. Il s'agit donc de disposer d'outils adéquats de prospective et d'anticipation stratégique. Plusieurs travaux, notamment de l'Agence internationale de l'énergie, d'organismes de recherche ou d'instituts techniques, en France et dans le monde, vont dans ce sens, et méritent d'être encouragés.

Pour développer ces connaissances et ces capacités d'analyse, il s'agira de mobiliser et de coordonner les actions et les initiatives des acteurs concernés en France : laboratoires de recherche, services d'études des ministères, experts français et européens, etc. Ceci passe également par une collaboration entre des industriels et des organismes comme l'Ademe, le CEA, le CNRS et différents centres de recherche. Cette mobilisation collective pourra se fonder sur la poursuite de la coopération engagée sur la base des travaux du plan ressources, dans le cadre par exemple d'un conseil scientifique et technique qui aurait un rôle consultatif sur l'orientation des études à mener, des complémentarités et des synergies, etc.

Cette mobilisation pour développer les connaissances pourra se concrétiser par :

- Un programme d'études dédié au sein du ministère de la Transition énergétique. Un tel programme pourrait s'inspirer de l'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (Efese¹⁷⁰), dont la gouvernance est fondée sur un comité scientifique et technique et un comité national des parties prenantes.
- Un programme incitatif de recherche, et la mise en synergie et en coordination des programmes existants qui traitent des enjeux matières ;
- La création et le développement d'une chaire de recherche interdisciplinaire dédiée aux ressources minérales de la transition bas-carbone.

Au sein de cette mobilisation collective, l'Ofremi permettra de structurer la connaissance des chaînes de valeur et de leurs approvisionnements en ressources minérales, grâce à une **veille et des études détaillées sur les chaînes de valeur des technologies de la transition bas-carbone, l'analyse des usages et de l'évolution des besoins en matières des filières aval, les vulnérabilités des chaînes de valeur sur l'ensemble du cycle de vie des produits, et les problématiques de traçabilité et d'approvisionnement responsable**. Ces travaux permettront d'identifier les entreprises françaises et européennes en position de force sur les marchés mondiaux, les options et les éventuelles synergies en matière de procédés de métallurgie et de recyclage, etc.

Un dernier enjeu en matière de connaissance concerne les données, souvent lacunaires et insuffisantes, qui concernent le secteur privé. Pour combler ce manque, il convient de mobiliser les données auprès des entreprises. Une enquête permettrait de connaître leurs besoins et leurs difficultés d'approvisionnement dans les secteurs jugés prioritaires. Cette enquête élargirait les sources d'informations existantes et fournirait des indicateurs statistiques de référence pour déceler des signaux faibles de tensions d'approvisionnement¹⁷¹ : volumes de production, intrants achetés, prix, provenance, stocks disponibles, stratégies de couvertures des risques d'approvisionnement, les délais de livraison, etc. Elle permettrait en outre de stimuler un échange régulier entre l'État et les entreprises sur le sujet. En contrepartie de leur participation un accès facilité aux mécanismes de soutien en cas de crise d'approvisionnement, ou des informations prospectives sur les marchés pourraient être offerts aux entreprises. Pour être utiles, ces données devraient collectées à haute fréquence pour tenir compte des retournements parfois très rapides de la conjoncture¹⁷².

Enfin, parce que les données en elles-mêmes n'ont pas de valeur sans capacités d'analyse solides, l'Ofremi développera un cadre d'analyse méthodologique des vulnérabilités d'approvisionnement et des filières responsables. À terme, cette méthodologie pourra permettre, dans des conditions à préciser, une auto-analyse des entreprises (sous forme de *due diligence*), pouvant donner lieu à une information des actionnaires, investisseurs et clients.

Recommandation 4

Développer, avec une ambition élevée et en visant l'excellence internationale, les connaissances et les capacités d'analyse stratégique et de prospective sur les chaînes de valeur bas-carbone et leur approvisionnement en ressources minérales. Pour cela, mobiliser, soutenir et coordonner l'ensemble des acteurs clefs dont les principaux sont regroupés au sein de l'Ofremi, les organismes de recherche, services d'études ministériels, etc.), à l'aide d'outils dédiés, notamment :

- les programmes d'études ministériels ;
- les programmes incitatifs de recherche ;
- la constitution d'une chaire de recherche.

¹⁷⁰ www.ecologie.gouv.fr/levaluation-francaise-des-ecosystemes-et-des-services-ecosystemiques#:~:text=L'Efese%20vise%20aussi%20%C3%A0,mat%C3%A8re%20gestion%20des%20%C3%A9cosyst%C3%A8mes

¹⁷¹ Un exemple pouvant servir d'inspiration est celui des enquêtes *Purchasing Managers' Index* (PMI), menées par IHS Markit (groupe S&P), mensuellement auprès de directeurs des achats d'un échantillon d'entreprises. Ces enquêtes revendentiquent d'aider « les répondants à mieux comprendre les aspects sous-jacents de la conjoncture économique et à identifier les points d'inflexion du cycle économique en cours. Elles constituent ainsi un outil permettant d'améliorer la prise de décision et les stratégies achats. » En contrepartie de leur réponse volontaire, les participants disposent d'accès gratuits aux rapports PMI.

¹⁷² Comme montré par l'INSEE dans le contexte économique de la crise Covid-19.

Mobiliser davantage le secteur privé pour améliorer les capacités d'analyse stratégique, en mobilisant davantage les données d'entreprises via une enquête permettant de connaître leurs besoins et leurs difficultés d'approvisionnement dans les secteurs identifiés, qui pourra servir de base à un service d'information stratégique partagé.

Développer grâce à l'Ofremi, en partenariat avec les acteurs concernés, un cadre d'analyse méthodologique des vulnérabilités d'approvisionnement des entreprises (combinant risques économiques et réputationnels), qui permettra à celles-ci de procéder à un auto-diagnostic.

AXE 3 - SAISIR, CRÉER ET DÉVELOPPER LES OPPORTUNITÉS INDUSTRIELLES / POUR UNE POLITIQUE INDUSTRIELLE AMBITIEUSE DES TECHNOLOGIES BAS-CARBONE EN FRANCE ET EN EUROPE

La tendance structurelle est à la baisse des capacités européennes de raffinage et de métallurgie depuis ces vingt dernières années¹⁷³ et à la concentration de la production en Chine (cf. II.D.1). Un soutien ciblé aux industries stratégiques des technologies bas-carbone apparaît nécessaire pour maintenir ou mieux augmenter les capacités européennes de production de métaux tout en sécurisant leur approvisionnement en ressources minérales. En complément de mesures de défense commerciale quand des situations de dumping pratiquées par des États tiers de l'Union, abusivement interventionnistes et/ou distorsives sont avérées, ainsi que de la sécurisation de leurs fournitures en besoins énergétiques, les industriels européens resteraient ainsi davantage compétitifs face aux industriels hors Europe, dont les investissements et la production sont subventionnés et peuvent gagner des parts de marché en bénéficiant d'économies d'échelle. Une attention particulière devrait également être portée sur la base industrielle métallurgique et chimique de l'Union dont les produits intermédiaires ou finaux alimentent les industries productrices des technologies bas-carbone nécessaires pour la transition de l'Union. Les effets de transferts de dépendances stratégiques et technologiques doivent être évités.

En matière de politique industrielle, il s'agit certes de se saisir des outils déjà existants, mais aussi de les faire évoluer et d'en développer de nouveaux afin d'être à la hauteur des enjeux, c'est-à-dire de la souveraineté énergétique de la France et de l'Europe dans les décennies à venir et de la décarbonation des sociétés dans leur ensemble. Se limiter aux dispositifs existants, créés dans des circonstances passées pour des objectifs différents, ne constitue certainement pas une réponse suffisante à la crise énergétique et environnementale actuelle et aux crises futures.

Les projets importants d'intérêt européen commun (PIIEC) pourraient être mobilisés davantage, en considérant des PIIEC par chaîne de valeur et plus particulièrement à toutes les étapes de la chaîne de valeur concernée, dont l'approvisionnement en matières premières et le recyclage. Ainsi un PIIEC relatif aux énergies renouvelables pourrait permettre d'embarquer des projets relatifs aux aimants permanents à base de terres rares et aux panneaux photovoltaïques sur le silicium. Cela suppose également des évolutions ou des assouplissements du cadre réglementaire des PIIEC sur les conditions actuellement requises pour garantir l'éligibilité de certains projets d'ampleur pour la production de matières premières critiques.

Des dispositifs innovants de politique industrielle visant l'excellence mondiale et la compétitivité internationale doivent être étudiés et développés. Une première piste consisterait, en complément des PIIEC, à développer un nouveau concept, celui des projets stratégiques nationaux d'intérêt européen. Dès lors qu'un pays membre de l'Union européenne développerait une technologie de rupture ou une innovation d'excellence dans le domaine des technologies bas-carbone, il serait soutenu afin de passer au stade de l'industrialisation rapide. Si cette innovation réussit, elle bénéficiera, directement ou indirectement, à l'ensemble des consommateurs et des citoyens de l'Union et à leur sécurité collective. Des synergies industrielles, éducatives et de recherche seront ensuite co-construites progressivement entre les pays-membres, sans pour autant freiner l'élan initial.

¹⁷³ <https://www.eurometaux.eu/metalscleanenergy>.

Une seconde piste consisterait à introduire dans les dispositifs de politique industrielle des incitations liées à la réduction des impacts environnementaux des procédés mobilisés, voire à la diversification des approvisionnements en intrants. Il s'agirait d'analyser les projets miniers et industriels en incluant les externalités positives et négatives liées aux métaux, tant sur les plans environnementaux et sociaux qu'économiques et stratégiques, afin de valoriser les avantages de long-terme de la localisation de ces activités en Europe, dans le cadre d'une stratégie de différenciation industrielle.

Enfin, la taxonomie verte étant amenée à jouer un rôle structurant dans les années à venir, il apparaît souhaitable que les investissements en exploration, production et recyclage de minéraux et métaux nécessaires aux technologies de la transition bas-carbone et à la base industrielle fournissant en intrants stratégiques ces mêmes filières y soient bien pris en compte, notamment à travers l'application du pilier « atténuation du changement climatique », activités nécessaires à la transition.

Recommandation 5

Développer des capacités de production française et européenne compétitives et innovantes dans les chaînes de valeur des technologies bas-carbone. Pour cela, mobiliser davantage les dispositifs existants, les faire évoluer et créer de nouveaux dispositifs de soutien industriel d'excellence :

- *Élargir le champ des PIIEC à des chaînes de valeur liées à la transition bas-carbone (EnR), incluant l'approvisionnement en matières premières et au recyclage.*
- *Engager plus généralement une réflexion sur les conditions réglementaires permettant l'éligibilité des projets de production de matières premières critiques dans le cadre des PIIEC.*
- *Développer de nouveaux dispositifs complémentaires, comme les projets stratégiques nationaux d'intérêt européen ou des incitations environnementales dans les PIIEC à des fins de différenciation industrielle de l'Europe sur les technologies bas-carbone.*

Intégrer dans les « activités durables » de la taxonomie¹⁷⁴ les investissements en exploration, production et recyclage de minéraux et métaux nécessaires aux technologies de la transition bas-carbone et à la base industrielle fournissant en intrants stratégiques ces mêmes filières technologiques.

AXE 3 - SAISIR, CRÉER ET DÉVELOPPER LES OPPORTUNITÉS INDUSTRIELLES / DÉVELOPPER DES INSTRUMENTS DE GESTION DES RISQUES POUR SÉCURISER LES INVESTISSEMENTS VIS-À-VIS DES FLUCTUATIONS CONJONCTURELLES

La transition bas-carbone sera vraisemblablement marquée par des épisodes de crises conjoncturelles, avec de fortes hausses des prix des matières premières suivies de chutes tout aussi rapides, ainsi que des difficultés d'approvisionnement en minéraux dans les qualités requises. Les emballements périodiques, parfois causés par l'imposition de quotas ou des crises dans des zones de production, peuvent être amplifiés par des mécanismes de marché à l'impact limité dans le temps, mais éprouvants sur le moment.

Ces fluctuations posent un problème pour la transition car elles engendrent de l'aversion au risque chez les investisseurs, et donc une diminution de leur appétence à investir. De même, elles peuvent remettre en cause les performances économiques et la compétitivité à court terme des unités de production, alors même que leur modèle économique est viable sur le long terme.

L'enjeu, pour les pouvoirs publics, est de pouvoir discerner entre les crises passagères et les modifications structurelles des marchés des métaux, et, pour les entreprises, de disposer d'instruments leur permettant de gérer ces risques. Les variations des prix lors de crises ponctuelles appellent des mécanismes de soutien conjoncturel plus que des ajustements de politiques industrielles, qui risqueraient de provoquer des surcapacités de production à moyen terme, ou qui pourraient distordre les investissements en faveur de capacités industrielles non compétitives. Pour développer ces instruments de gestion des risques dans les secteurs stratégiques des technologies bas-carbone, un groupe d'analyse formulera des propositions

¹⁷⁴ Règlement (UE) 2020/852 du Parlement européen et du Conseil du 18 juin 2020 sur l'établissement d'un cadre visant à favoriser les investissements.

concrètes d'outils immédiatement opérationnels. Ces outils couvriront le champ de l'assurance, des fonds de réserve, mais aussi la dimension bancaire. Il s'agira de s'inspirer des retours d'expérience à l'étranger en les adaptant au contexte national et européen¹⁷⁵.

Enfin, une gouvernance d'ensemble cohérente et stable est nécessaire sur le plan institutionnel. La prise en compte des enjeux de ressources minérales dans le cadre du conseil de planification écologique permettrait de déclencher et mobiliser les instruments de gestion des risques, dans des délais rapides, sur des objectifs bien ciblés, la réactivité et la souplesse d'adaptation étant cruciales pour la gestion de crise.

Recommandation 6

Mettre en place un groupe d'analyse pour créer des instruments de gestion des risques (mécanisme assurantiel, fonds de réserve, garantie bancaire) visant à sécuriser les producteurs européens stratégiques lors de crises de courte durée.

Développer une gouvernance des risques liés à la transition bas-carbone sous l'égide du conseil de planification écologique.

Axe 3 - SAISIR, CRÉER ET DÉVELOPPER LES OPPORTUNITÉS INDUSTRIELLES / ACCOMPAGNER LA RÉÉMERGENCE DE L'INDUSTRIE MINIÈRE EUROPÉENNE

Le sous-sol européen recèle des gisements exploitables au cours des prochaines décennies. Afin de réduire à la fois les dépendances stratégiques à long terme et la pollution importée d'autres continents, **accélérer l'exploration du sous-sol français et européen est une nécessité. À ce titre, le PEPR exploratoire sous-sol (Plan de relance) sera l'un des lieux d'échange et de collaboration privilégié de la communauté française travaillant sur ces enjeux.**

Des exemples, scandinaves et autrichiens, ainsi que des initiatives « mine responsable », montrent la capacité des acteurs européens à innover en faveur de modes d'exploitation durables et responsables. Pour assurer une cohérence entre elles, **les exploitations minières européennes, ou opérant en Europe, devront se conformer aux normes certifiées par la Commission européenne en matière de mine responsable.**

Recommandation 7

Relancer et accélérer l'exploration du sous-sol français et européen afin de mieux connaître le potentiel en ressources minérales et en métaux critiques et stratégiques.

Encourager l'Union européenne à mettre en place un système d'homologation des labels de la mine responsable.

Au niveau international : définir un socle de critères ESG communément partagés par les pays producteurs et consommateurs de métaux sur l'exploitation minière ; œuvrer pour la mise en place d'une gouvernance mondiale sur la gestion des ressources minérales permettant d'engager l'ensemble des acteurs du secteur dans une approche responsable et durable.

¹⁷⁵ Par exemple, afin de faciliter les investissements miniers à l'étranger destinés à sécuriser les approvisionnements en matières premières des entreprises françaises, nous recommandons de mettre en place des garanties bancaires, par des assureurs tels que Coface ou Bpifrance Assurance-export, sur le modèle des garanties UFK en Allemagne. Les grandes banques françaises (BNP, Crédit Agricole, Natixis et Société Générale) sont parmi les plus actives au monde en financement de projets, et pourraient donc contribuer à la démarche, tout comme des spécialistes français de l'assurance-export et crédit que sont Coface ou Bpifrance.

AXE 3 - SAISIR, CRÉER ET DÉVELOPPER LES OPPORTUNITÉS INDUSTRIELLES / DÉVELOPPER L'INDUSTRIE EUROPÉENNE DU RECYCLAGE

Des objectifs qualitatifs et des pourcentages spécifiques sont à fixer pour chaque métal, afin de favoriser le recyclage vers des applications à haute valeur ajoutée. Les objectifs de recyclage des technologies de la transition bas-carbone concernent déjà le photovoltaïque, l'éolien et la filière batteries, sur la base de critères principalement quantitatifs, en pourcentage de la masse totale à recycler, et sur un taux d'incorporation de matières recyclées en ce qui concerne les batteries.

Des filières industrielles déjà en place ou en croissance (par exemple : Soren pour le photovoltaïque) seront à mobiliser. Pour certaines matières, l'innovation permettra de développer des filières spécifiques aussi bien en France qu'en Europe (par exemple : pour les terres rares). **Limiter l'export de déchets contenant des métaux critiques permettra de les recycler en Europe dans de meilleures conditions environnementales et sociales.** Ces déchets devront rester disponibles en priorité pour les industriels européens.

Recommandation 8

Fixer, au-delà des objectifs quantitatifs, des objectifs qualitatifs pour chaque métal à recycler pour tout équipement de la transition bas-carbone, afin d'éviter le down-cycling.

N'autoriser l'exportation des déchets recyclables en Europe que sous réserve qu'ils soient traités dans des conditions environnementales et sociales au moins aussi bonnes que celles ayant cours dans l'UE.

AXE 4 - RÉDUIRE LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX/ ASSURER LA TRANSPARENCE DES CHAÎNES DE VALEUR

Compte tenu des risques qu'ils font peser sur les approvisionnements, la réduction des impacts environnementaux et sociaux de la production des métaux est une nécessité, pour la sécurisation des approvisionnements européens.

La gestion des aspects sociaux ne se réduit pas à une question technique de « traçabilité », et ne se développera pas sans obligation vis-à-vis des entreprises, et responsabilisation de celles-ci. Les entreprises sont les seules à même de lever l'opacité sur leurs fournisseurs N+1, voire sur leurs clients N-1. Sont à préciser les informations qui relèvent du secret des affaires, les informations qu'un client est en droit d'exiger de son fournisseur, les informations susceptibles d'être rendues publiques, ainsi que celles à vérifier et auditer.

Plusieurs pistes peuvent être évoquées :

- Un rôle pour les autorités publiques de certification des labels existants.
- Le développement de mécanismes permettant de rechercher a posteriori les dysfonctionnements et responsabilités suite à la survenance d'un dommage social ou environnemental (une sorte de bureau « enquête accident » de la RSE permettant d'identifier les entreprises concernées, les manquements des acteurs économiques, voire les défauts dans les systèmes de gestions ou labels utilisés).
- Tout en conservant le principe d'une responsabilité individuelle des entreprises, les autorités publiques pourront mener des efforts pour mieux expliciter les attentes RSE.
- La coopération avec d'autres pays sur les attentes RSE notamment avec les pays en voie de développement, pour les accompagner sur l'évolution des conditions d'extraction.

Recommandation 9

Systématiser le devoir de diligence pour les producteurs et importateurs de métaux critiques et des produits les contenant afin d'accroître la transparence sur ces chaînes de valeur, depuis l'amont minier jusqu'aux consommateurs.

Établir des règles précises sur la transparence et la publicité des informations circulant dans la chaîne de valeur, depuis le site minier jusqu'au consommateur.

Informier les consommateurs sur l'origine des matières premières et sur l'impact environnemental des produits qu'ils consomment.

AXE 4 - RÉDUIRE LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX / DÉVELOPPER L'ÉCOCONCEPTION

L'apparition à venir de nouvelles technologies est l'occasion de faire de l'écoconception un axe différenciant et un avantage comparatif en faveur de l'Europe. L'écoconception consiste à réduire l'impact environnemental d'un produit et faciliter son recyclage en fin de vie. Néanmoins, la conception d'un produit est située en amont du cycle de développement et doit donc concerner en priorité les technologies émergentes pour éviter de se retrouver en concurrence avec des filières matures à bas coûts. **Nous recommandons de faire de l'écoconception un axe différenciant de l'industrie européenne, particulièrement sur les technologies émergentes.** Pour les technologies existantes, nous recommandons de développer l'écoconception à travers les filières REP existantes sur les technologies de la transition bas-carbone (solaire photovoltaïque, batteries, véhicules).

Ceci implique notamment de soutenir la R&D et de développer la capacité de former des ingénieurs et techniciens nécessaires, mais également de soutenir la demande pour ces produits écoconçus. L'Ademe et le pôle écoconception¹⁷⁶ doivent permettre la diffusion de l'écoconception dans les entreprises et le secteur éducatif.

Au niveau européen, la révision en cours de la directive écoconception¹⁷⁷ doit permettre d'afficher un haut niveau d'ambition pour rendre les produits plus durables, fiables, réutilisables, évolutifs, réparables, faciles à entretenir, à rénover et à recycler, et efficaces sur le plan de l'énergie et des ressources. Cette ambition s'appuie sur le déploiement de passeports matières qui facilitent la connaissance et la communication des caractéristiques environnementales des produits. **Nous recommandons d'étendre le champ d'application de la directive écoconception à tous les produits de la transition bas-carbone.**

La démarche *low-tech*¹⁷⁸ s'inscrit dans le cadre de l'écoconception et contribue à la réduction des dépendances stratégiques et des impacts environnementaux et sociaux de la production et de l'usage des technologies bas-carbone. **Nous recommandons d'inclure la *low-tech* et les innovations permettant la sobriété dans les dispositifs de soutien à la recherche et l'innovation, et de permettre par le cadre réglementaire de tester et déployer ces innovations.**

Recommandation 10

Faire de l'écoconception, en incluant la low-tech, un axe de différenciation qualitative de l'industrie européenne au regard des politiques publiques, particulièrement sur les technologies émergentes, et créer des labels correspondants. Pour les technologies existantes, s'appuyer sur les filières REP existantes pour diffuser l'écoconception.

Étendre le champ d'application de la directive écoconception à tous les équipements de la transition bas-carbone.

AXE 4 - RÉDUIRE LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX / ÉVALUER LES POLITIQUES PUBLIQUES ET LEURS IMPACTS EN MATIÈRE DE RESSOURCES MINÉRALES

À partir des données ainsi collectées, **nous recommandons de mettre en place un cadre systématique d'évaluation des politiques publiques pour leur contribution à la demande en ressources minérales critiques et les impacts sociaux et environnementaux de celle-ci.** Cette évaluation prendra en compte les enjeux matières, les effets incitatifs des dispositifs publics sur les choix technologiques des industriels et la durée d'usage des technologies déployées. Ces évaluations orienteront les politiques publiques afin de maîtriser la demande en ressources minérales et de réduire les impacts environnementaux et sociaux qui leurs sont associés.

Recommandation 11

Mettre en place un cadre systématique d'évaluation des politiques publiques pour leur contribution à la demande en ressources minérales critiques et leurs impacts sociaux et environnementaux.

¹⁷⁶ <https://www.eco-conception.fr/>

¹⁷⁷ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0140&qid=1649112555090>.

¹⁷⁸ Le Low-Tech Lab utilise le terme *low-tech* pour qualifier des objets, des systèmes, des techniques, des services, des savoir-faire, des pratiques, des modes de vie et même des courants de pensée ayant pour principes l'utilité, l'accessibilité et la durabilité.

AXE 4 - RÉDUIRE LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX / FAVORISER LES APPROVISIONNEMENTS RESPECTUEUX DES NORMES ENVIRONNEMENTALES ET SOCIALES DANS LES POLITIQUES COMMERCIALES

Les politiques commerciales européennes peuvent être un instrument pour favoriser les productions les plus vertueuses sur les plans environnementaux et sociaux.

Au niveau unilatéral, deux types d'instruments permettent d'atteindre cet objectif : le devoir de vigilance des entreprises et les « mesures miroirs ». En droit français, la loi de mars 2017 sur le devoir de vigilance impose aux entreprises de prendre des « mesures de vigilance raisonnable propres à identifier les risques et à prévenir les atteintes graves envers les droits humains et les libertés fondamentales, la santé et la sécurité des personnes ainsi que l'environnement ». Une directive européenne en cours de négociation inscrit ce devoir de vigilance dans le droit européen et s'applique explicitement aux activités d'exploitation des ressources minérales. Les « mesures miroirs » consistent à interdire l'importation de produits qui ne respectent pas les standards de production sanitaires et environnementaux de l'Union européenne. Par exemple, l'article 41 du projet de règlement « batteries »¹⁷⁹ impose aux importateurs et producteurs de batteries de ne mettre sur le marché que des produits respectant les normes de production du règlement, dont des normes environnementales (contenu recyclé ou empreinte carbone par exemple). La mobilisation conjointe de ces deux leviers peut assurer la qualité des importations de produits dépendant de ressources minérales stratégiques.

Au niveau bilatéral, certaines situations précises justifient l'introduction dans les accords commerciaux de conditionnalités tarifaires ciblées, liées à la durabilité des produits, lorsqu'elles renforcent la contribution de ces accords aux objectifs environnementaux et sociaux poursuivis par l'UE.

Que ce soit au niveau unilatéral ou multilatéral, ces mesures commerciales doivent respecter le droit de l'OMC, qui permet sous certaines conditions¹⁸⁰ de restreindre les flux commerciaux pour des motifs environnementaux ou sanitaires.

Dans le même temps, afin de permettre la diversification des approvisionnements en métaux de l'Union européenne tout en limitant les risques sociaux et environnementaux, **la diplomatie des métaux peut accompagner la transition des pays en développement vers des standards d'exploitation équivalents aux normes certifiées par la Commission européenne en matière de mines responsables.**

La lutte contre les violations des droits humains fondamentaux, notamment le travail forcé, est nécessaire pour des raisons morales, et aussi pour éviter l'impact sur les approvisionnements de sanctions internationales, ou unilatérales, comme celles des États-Unis à l'égard des produits issus du travail des Ouïghours. Une première étape consiste à inclure dans les cahiers des charges des appels d'offres et marchés publics relatifs au déploiement de technologies bas-carbone l'obligation pour les candidats de produire un audit garantissant l'absence de pratiques sociales non conformes aux meilleures pratiques, et notamment du recours au travail forcé dans leur chaîne d'approvisionnement en matières et en composants.

Recommandation 12

Œuvrer auprès de la Commission européenne et du Conseil pour que la politique commerciale européenne favorise les approvisionnements respectueux des normes les plus strictes en matière d'impacts environnementaux, sanitaires et sociaux.

Accompagner la transition des pays en développement vers des standards d'exploitation équivalents aux normes certifiées par la Commission européenne en matière de mines responsables.

¹⁷⁹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=COM:2020:798:FIN>.

¹⁸⁰ Notamment : avoir un objectif purement environnemental (ou sanitaire), être nécessaire pour atteindre l'objectif poursuivi sans qu'il n'existe de mesure alternative disponible moins restrictive pour le commerce, être fondée scientifiquement et avoir un effet sur des phénomènes mondiaux, et non locaux.

3. RECOMMANDATIONS ISSUES DES RAPPORTS THÉMATIQUES

POURSUIVRE ET INTENSIFIER LES EFFORTS DE R&D EN VISANT L'EXCELLENCE INTERNATIONALE

Parce que les investissements en R&D d'aujourd'hui seront à la base de la compétitivité des dix à vingt ans à venir, il apparaît absolument nécessaire de poursuivre et même d'intensifier les efforts de recherche et développement dans les secteurs des technologies bas-carbone, dans une perspective d'excellence internationale. La dépendance des chaînes de valeur bas-carbone ne concerne pas que les ressources minérales ou les outils industriels : le capital humain et les ressources immatérielles (brevets, innovations, etc.) en constituent une facette à ne pas sous-estimer. Il s'agit en particulier de :

- soutenir la recherche, le développement et le passage à l'industrialisation des innovations de rupture ;
- orienter massivement la recherche vers le développement de produits innovants ;
- assurer le maintien des compétences R&D nécessaires au développement de nouvelles technologies pour les secteurs stratégiques ;
- développer la valorisation des compétences développées en R&D.

ANTICIPER ET INVESTIR DANS LA FORMATION ET LE DÉVELOPPEMENT DES COMPÉTENCES

Une seconde recommandation commune aux quatre rapports thématiques concerne la formation et le développement des compétences. Il s'agit notamment de :

- anticiper les nouveaux besoins en compétence ;
- encourager la recherche et les formations dans les métiers des technologies bas-carbone ;
- déterminer les formations structurantes à mettre en place, à tous les échelons (techniciens, modélisateurs, ingénieurs etc.), ainsi que les diplômes associés, pour les nouveaux métiers liés aux technologies bas-carbone, la maintenance des nouveaux systèmes (batteries, électrolyseurs, etc.). Ce travail sera mené par filière industrielle sous l'égide du ministère du Travail.
- assurer le maintien des compétences et stimuler l'attractivité des métiers de la R&D dans le domaine des technologies bas-carbone.

Annexes :

résumés des rapports thématiques du
plan de programmation des ressources
de la transition bas-carbone

Annexe 1 : résumé du rapport sur le photovoltaïque

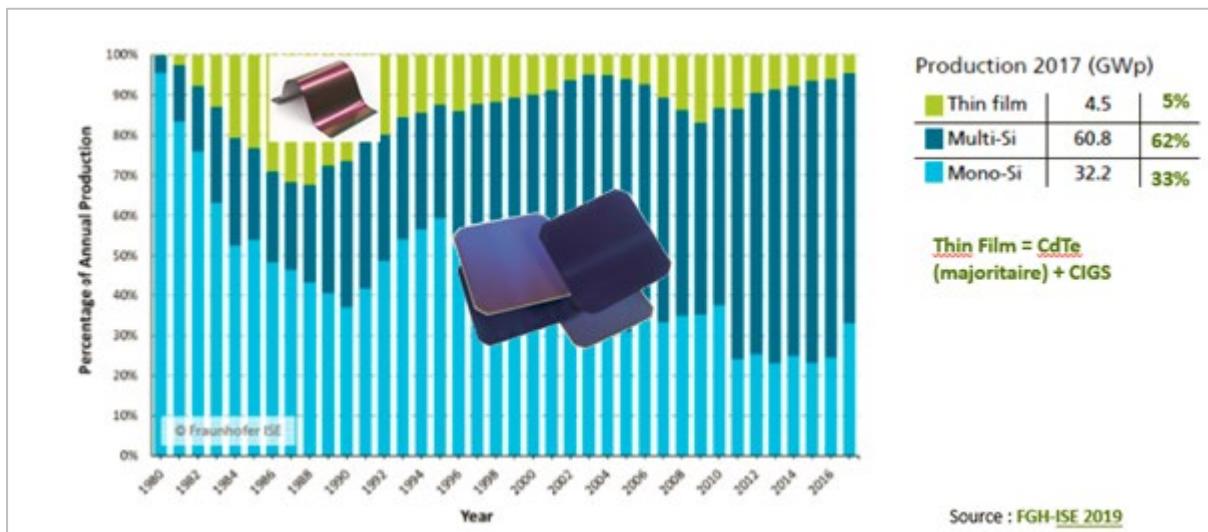
1. LE PHOTOVOLTAÏQUE VA CONNAÎTRE UNE FORTE CROISSANCE DANS LES ANNÉES À VENIR, EN FRANCE ET DANS LE MONDE

L'énergie photovoltaïque est devenue une des sources les plus compétitives de production d'énergie renouvelable dans le monde. Elle va donc jouer un rôle majeur dans la transition bas-carbone. Le développement attendu pourrait conduire à installer, chaque jour, 1,4 million de modules dans le monde, dont 25 000 en France.

2. LES ENJEUX MATIÈRES DU DÉVELOPPEMENT DU PHOTOVOLTAÏQUE SONT LIMITÉS MAIS LA VIGILANCE S'IMPOSE EN RAISON DE LA HAUSSE DE LA DEMANDE

Le photovoltaïque représente une part significative de la consommation de l'argent, du silicium métal et du tellure, et aura donc un impact significatif sur la demande de ces métaux. L'ampleur de cette demande dépendra des technologies photovoltaïques utilisées et de leurs évolutions. L'argent et le silicium métal doivent faire l'objet d'une attention particulière car les technologies qui dominent le marché aujourd'hui, et dans les années à venir, sont les technologies dites cristallines (*figure 1*), qui les mobilisent en quantité importante. Or ces matières ne sont aujourd'hui pas récupérées dans les modules en fin de vie.

Figure 1 : pourcentage annuel de production de panneaux photovoltaïques mono, poly-cristallins et en couches minces



Source : FGH-ISE, 2019

Pour les autres matières, les risques économiques, environnementaux et sociaux liés sont davantage déterminés par l'évolution des besoins des autres secteurs : béton, métaux de base, aluminium, cuivre, etc. Une vigilance particulière doit donc être accordée aux matières confrontées à une augmentation de la demande de plusieurs secteurs. C'est notamment le cas du cuivre et, dans une moindre mesure, de l'aluminium.

Le cas particulier du cadmium et du plomb. Le cadmium est mobilisé par la technologie dite en couches minces qui, bien que peu mobilisée au niveau mondial (*figure 1*), est plus largement utilisée en France du fait de son bilan carbone avantageux. Le plomb est susceptible d'être utilisé dans certaines technologies d'avenir prometteuses. La gestion de ces métaux lourds, toxiques, même utilisés en petite quantité, doit obéir à des exigences environnementales et sanitaires strictes.

Au total, même si le développement du photovoltaïque va mobiliser une grande diversité de ressources minérales, les risques économiques, environnementaux et sociaux associés sont limités. Le risque direct sur la disponibilité des ressources minérales non transformées pour la production des modules apparaît aujourd’hui limité pour les industriels français comme pour ceux de l’Union européenne en général. En effet, ceux-ci s’approvisionnent principalement en produits finis et semi-finis (cellules, modules, cadre d’aluminium, pâte d’argent métallique, etc.).

3. LE PRINCIPAL RISQUE EST CELUI DE LA DÉPENDANCE TECHNOLOGIQUE

Comme le montre la *figure 2*, les principales étapes industrielles de la production de panneaux photovoltaïques se concentrent en Chine, rendant la France comme l’Europe dépendantes d’un point de vue technologique.

Tableau 2 : structure de la chaîne de valeur des modules cristallins

Segment de la chaîne de valeur	Capacité de production mondiale (en kt ou en GWc) ou production	Part de la production chinoise (y compris taiwanaise) dans la production mondiale	Indice de concentration géographique de la production (IHH) ¹⁸¹	Concentration de marché (part des 10 plus grosses entreprises dans la production mondiale)	Répartition des entreprises du top 10 (2)
Silicium métal (2018) (1)	3 000 kt	68 %	IHH = 0,48	---	---
Polysilicium (2018)	475 - 578 kt (3)	45 % (4)	---	---	7 asiatiques (dont 6 chinoises), 2 européennes, 1 nord-américaine
Lingots	Forte intégration des étapes polysilicium et lingots				
Plaquettes	---	90 % (4)	---	---	10 entreprises asiatiques (dont 9 chinoises)
Cellules	115 GWc	79 % (4)	---	---	10 entreprises asiatiques (dont 7 chinoises)
Modules	115 GWc	73 % (4)		70 % (plus de 1 000 producteurs)	9 entreprises asiatiques (dont 8 chinoises)

Sources : (1) BRGM – Fiche de criticité silicium ; (2) Bloomberg New Energy Finance ; (3) JRC ; (4) CEA, Litén/DTS/FB

Les acteurs du photovoltaïque français se répartissent en effet sur les activités non industrielles, à l’aval de la chaîne de valeur : développement, installation, maintenance. Ces activités concentrent aujourd’hui l’essentiel des emplois et de la création de valeur ajoutée dans la filière photovoltaïque en France. La France ne compte plus que quelques rares acteurs industriels qui peinent à être compétitifs par rapport à leurs concurrents étrangers, notamment asiatiques. La situation est la même pour les acteurs européens.

Les faiblesses des filières française et européenne du photovoltaïque menacent également la recherche qui demeure, pour l’instant, performante, notamment grâce à des liens solides entre la recherche-développement publique et l’industrie (laboratoires français à la pointe de l’innovation mondiale). La disparition des acteurs industriels (premières sources de financement de ces laboratoires) et l’absence grandissante de débouchés industriels en France ou en Europe pour ces innovations pourraient faire disparaître cet écosystème, qui pourtant constitue un réel atout dans la compétition mondiale.

¹⁸¹ L’IHH (indice de Herfindahl-Hirschman) est un indice qui mesure la concentration du marché. Plus il est élevé, plus la production est concentrée. Il est calculé en additionnant le carré des parts de marché de toutes les entreprises (ou de tous les pays) du secteur considéré.

4. MALGRÉ CETTE SITUATION DIFFICILE, DES OPPORTUNITÉS INDUSTRIELLES SONT ENCORE POSSIBLES EN FRANCE FONDÉES SUR L'INNOVATION DE POINTE ET LE BILAN ENVIRONNEMENTAL POSITIF

Même si, comparativement aux énergies fossiles, l'énergie photovoltaïque présente un très bon bilan carbone, celui-ci pourrait être amélioré en relocalisant la production des panneaux en Europe. En effet, les procédés de transformation du silicium sont très énergivores : la localisation d'une part importante de la production dans des pays où l'énergie est majoritairement produite à partir de charbon et/ou de pétrole (notamment en Chine) et les importantes pertes de matières, en particulier de silicium, le long de la chaîne de valeur dégradent le bilan carbone de la fabrication des modules photovoltaïques.

Le développement d'une filière photovoltaïque bas-carbone constitue une opportunité pour relocaliser en Europe toute ou partie de la filière. Elle n'est réalisable qu'avec une forte implication des industriels et des pouvoirs publics. Forte de son mix électrique très bas-carbone, de la robustesse de son réseau de laboratoires de recherche et de ses équipementiers innovants, la France pourrait développer des activités à la fois sur l'amont de la filière PV et sur son aval, notamment vers des produits photovoltaïques dits de niche qui présentent une réelle opportunité de marché (par exemple pour l'environnement bâti, la mobilité et les applications nomades).

Le recyclage à haute valeur ajoutée des panneaux usagés constitue également un segment de la chaîne de valeur qui pourrait être investi par la France. Cette dernière dispose d'atouts pour investir ce segment aujourd'hui orphelin : un éco-organisme, une usine de traitement des déchets de panneaux cristallins usagés et des start-up engagées dans la recherche de solutions innovantes pour recycler, dans des applications à haute valeur ajoutée, les principales matières présentes dans ces panneaux. Le verre, qui peut constituer jusqu'à 90 % du poids d'un module présente de fortes opportunités pour une meilleure valorisation. Aujourd'hui, il est principalement valorisé sous forme de sous-couche routière. Or, une meilleure conception des modules et le développement de nouveaux procédés de recyclage ouvrent la porte à un recyclage dans des applications de type verre pour les bâtiments voire pour les modules PV eux-mêmes.

Plusieurs conditions sont requises pour qu'un tel projet voie le jour et perdure : des acteurs industriels qui se fédèrent autour d'objectifs communs ; des pouvoirs publics qui mettent en place un cadre de régulation favorable à la mise en œuvre de ces objectifs tout en veillant à maintenir une concurrence par les prix (indispensable pour préserver une dynamique d'innovation et le maintien du tissu de laboratoires de recherche). Un tel projet de réindustrialisation devrait être précédé par des études préalables pour estimer l'impact d'un *made in Europe* sur le coût du kWc et son impact sur la vitesse de déploiement du photovoltaïque.

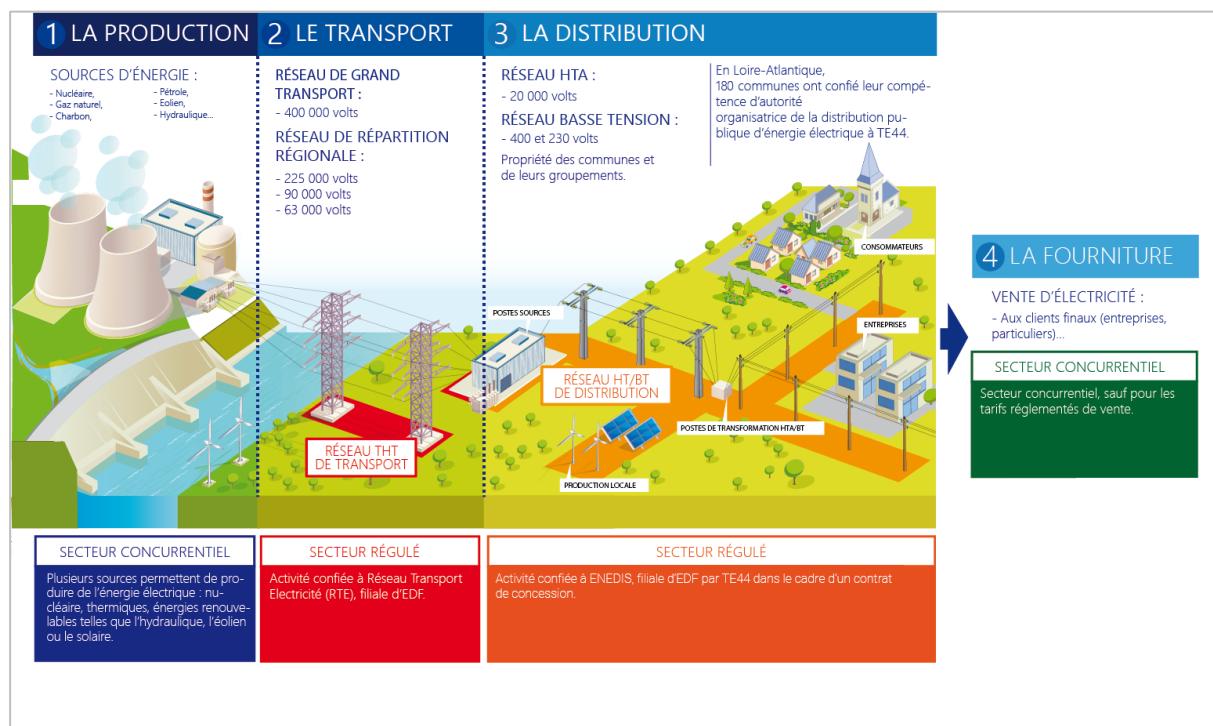
Annexe 2 : résumé du rapport sur les réseaux et stockage électriques

1. LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE FRANÇAIS SE COMPOSE DES MAILLONS SUIVANTS, DU PRODUCTEUR AU CONSOMMATEUR

Le réseau électrique français est âgé de 50 ans en moyenne. Son architecture est historiquement centrée sur les grandes centrales de production. Il se compose des maillons suivants (*figure 1*) :

- Production : secteur concurrentiel. Centrales nucléaires, thermiques, EnR, etc.
- Réseau de grand transport : 46 000 km de lignes à très haute tension. Secteur régulé confié à RTE.
- Réseau de répartition régionale : 54 000 km de lignes à haute tension. Secteur régulé confié à RTE.
- Réseau de distribution : 1,4 million de km de lignes à moyenne ou basse tension. Secteur régulé confié principalement à Enedis.
- Fourniture : secteur concurrentiel.

Figure 1 : les maillons du système électrique



Quelques chiffres :

- réseau de transport : 100 000 km de lignes HT pour les autoroutes et 54 000 pour les réseaux régionaux
- réseau distribution : 14,4 millions de km de lignes

Source : SYDELA

2. LE DÉVELOPPEMENT DES EnR NON PILOTABLES (ÉOLIENNES ET PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES) CONSTITUERA UN CHANGEMENT DE PARADIGME POUR L'ARCHITECTURE ET POUR LA GESTION OPÉRATIONNELLE DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

Il s'agira dans les années à venir de :

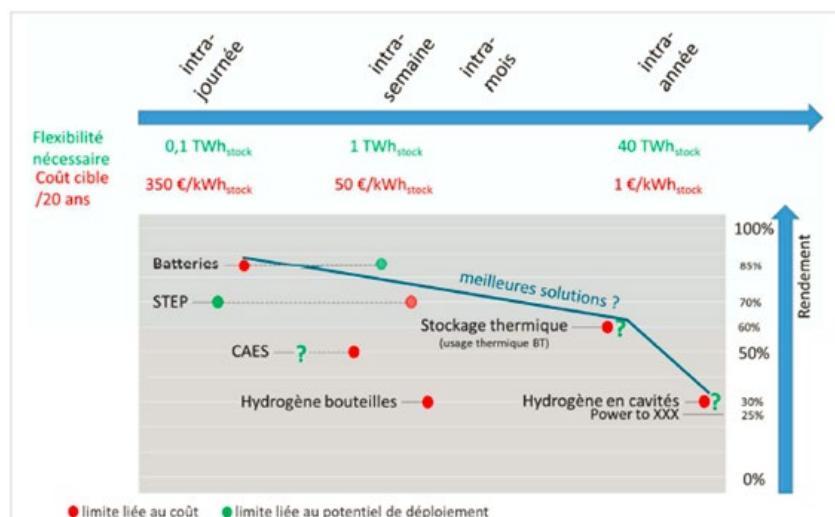
- **Créer de nouvelles lignes et renforcer celles existantes pour raccorder au réseau les futures installations EnR.** Ces créations seront rendues nécessaires par le caractère décentralisé des EnR, ce qui impliquera de transporter l'électricité des nouveaux lieux de production, souvent situés en zones rurales, vers les lieux de consommation, souvent concentrés dans les grandes métropoles.
- **Gérer la variabilité de l'offre et de la demande d'électricité,** pour qu'en permanence, la production instantanée soit égale à la consommation instantanée, l'électricité ne se stockant pas ou très mal. Or, la production d'électricité par les EnR non pilotables (vent, ensoleillement) n'est pas naturellement ajustée à la consommation instantanée.

D'ici à 2035, l'effet de « foisonnement » lié à la croissance du réseau sera suffisant pour gérer la variabilité offre-demande d'électricité. La large échelle géographique du réseau français (et européen) permettra, par une mutualisation des variations météorologiques et le pilotage d'une partie de la consommation ou de la production, d'assurer l'équilibre nécessaire au réseau. Pour profiter de ces possibilités, il faudra construire de nouvelles lignes et accélérer la transition numérique du réseau (*smart grids*), qui permettra une gestion optimisée des infrastructures.

Mais à partir de 2035, il faudra faire davantage pour gérer cette variabilité offre-demande liée aux EnR non pilotables, en faisant appel aux technologies de stockage d'électricité (figure 2) :

- **Pour un stockage de quelques jours, la batterie (lithium-ion notamment) semble être la technologie la plus aboutie.** Deux solutions sont envisageables : l'installation de batteries stationnaires dédiées au stockage, ou l'utilisation des batteries des véhicules électriques pour fournir de l'énergie au réseau lorsque ces derniers sont à l'arrêt. Cette seconde option paraît plus pertinente sur le plan économique et environnemental. Les batteries dédiées au stockage stationnaire ne conviendraient *in fine* qu'à des marchés de niches : zones non interconnectées et certaines installations d'autoconsommation.
- **Pour un stockage saisonnier sur plusieurs mois, les caractéristiques techniques à atteindre sont particulièrement exigeantes : faible coût, durée de stockage longue, etc. L'utilisation de l'hydrogène, fabriqué par électrolyse de l'eau et stocké dans les canalisations de gaz existantes ou dans des réservoirs géologiques dédiés, fait partie des solutions envisagées (technologie alcaline et technologie membrane à échange de protons, dite proton-exchange-membrane). En complément ou en remplacement de l'hydrogène, le stockage thermique (eau chaude stockée dans des cavités géologiques ou en réservoirs de surface par exemple) semble également une voie pertinente.**

Figure 2 : comparaison des solutions de stockage, en fonction de leur coût, leur rendement et leur potentiel de déploiement



Source : CEA

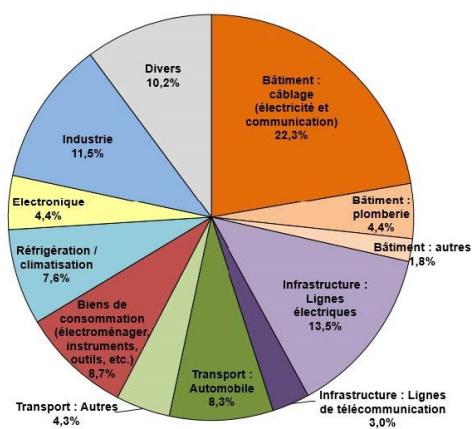
3. LE RENFORCEMENT ET LA CONSTRUCTION DE NOUVELLES LIGNES VONT MOBILISER DES MATIÈRES MOINS RARES MAIS EN PLUS GRANDES QUANTITÉS, CE QUI SERA SOURCE DE RISQUES

La consommation annuelle de métaux pour fabriquer les câbles électriques passera de 9 000 t/an en 2018 à 47 000 t/an sur la période 2020-2035 (dont 30 000 t de fer ; 10 000 t d'aluminium ; 7 000 t de cuivre). La consommation annuelle de béton passera de 110 000 t/an en 2018 à 160 000 t/an sur la période 2020-2035.

Cette augmentation de la consommation de matières pour les réseaux électriques sera source de risques pour la transition bas-carbone :

- **Risques d'approvisionnement et de prix.** S'il n'y a pas de risque d'épuisement géologique, un risque de pénurie momentanée, lié à une adaptation de l'offre à la demande décalée dans le temps, existe. Des hausses de prix pourraient ralentir la mise en œuvre de la transition bas-carbone, d'autant que le cuivre et l'aluminium sont fortement mobilisés par la transition énergétique dans son ensemble (*figures 3 et 4*)

Figure 3 : les principaux usages du cuivre en 2016



Source : BRGM, d'après Copperalliance

Figure 4 : les principaux usages de l'aluminium en 2018



Source : www.rncan.gc.ca

- **Risques géopolitiques.** Les capacités liées à la première transformation des matières extraites de mines, notamment de cuivre, se concentrent en Chine, créant de nouvelles dépendances auxquelles s'ajoute, pour l'aluminium, une vulnérabilité forte de la France à une entreprise russe.
- **Risques environnementaux et sociaux.** Les impacts environnementaux du cuivre sont très importants et principalement liés à la consommation d'eau, notamment dans des zones arides comme au Chili. Pour l'aluminium, l'impact majeur se situe au niveau des émissions de gaz à effet de serre engendrées par sa production. Ces impacts, s'ils ne sont pas atténués, risquent de compromettre l'offre (grèves, opposition des populations locales, restrictions au commerce, etc.) et la demande (demande sociétale pour un approvisionnement plus éthique, à la fois sur le plan environnemental et social).

Concernant la transition numérique du réseau (*smart grids*), les connaissances sont lacunaires sur la quantité d'équipements nécessaires et sur leur contenu en matières. On anticipe cependant une importante vulnérabilité de l'Europe vis-à-vis des composants électroniques produits pour l'essentiel en Asie. Par ailleurs, cette transition numérique « peut faire » ou « fait » peser d'autres vulnérabilités sur les réseaux électriques : les orages magnétiques liés aux variations cycliques de 11 ans de l'activité solaire peuvent provoquer d'importantes perturbations sur le réseau, les cyberattaques déjà identifiées et traitées par le gestionnaire du réseau.

4. AU-DELÀ DE 2035, LE DÉVELOPPEMENT D'UN STOCKAGE SAISONNIER UTILISANT L'HYDROGÈNE MOBILISERA DES PLATINOÏDES (PLATINE, PALLADIUM, IRIDIUM, RUTHÉNIUM) POUR FABRIQUER LES ÉLECTROLYSEURS :

En matière de rareté géologique, les risques semblent faibles, sauf sur l'iridium dont la production est très faible et pour lequel les connaissances sont peu importantes.

En revanche, les risques géopolitiques sont forts, notamment sur la partie extraction. La technologie étant récente, d'importantes diminutions des quantités de platinoïdes utilisées sont à attendre.

5. CE CONTEXTE PEUT OFFRIR DES OPPORTUNITÉS INDUSTRIELLES POUR L'INDUSTRIE FRANÇAISE, EN PARTICULIER

Plusieurs opportunités émergent, en particulier :

- Le mix électrique peu carboné de la France lui permet de produire un aluminium bas-carbone.
- Le développement du recyclage, notamment des câbles en cuivre et en aluminium, présente un intérêt sur le plan industriel et environnemental.
- Pour le béton, l'approvisionnement est principalement local. La ressource est abondante, mais un travail doit être mené pour éviter l'hostilité des riverains aux projets d'ouverture et d'extension de carrières. Du fait de l'application des standards de production français et européens, les impacts environnementaux sont limités.
- La filière de l'hydrogène, encore très jeune, offre des opportunités significatives pour l'industrie européenne. Elle est stratégique car elle concerne de nombreux usages (réseau mais également mobilité et décarbonation de l'industrie).

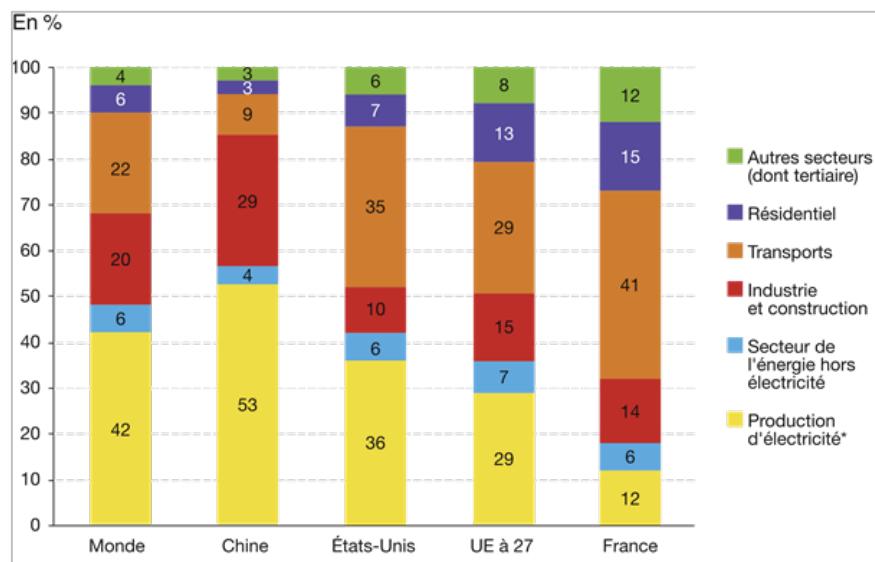
Une réflexion globale est indispensable pour développer ensemble ces opportunités, car chaque décision sur le réseau et de déploiement des EnR a des conséquences, plus ou moins importantes, sur l'ensemble du système, et peut être source de fragilité. Une réflexion globale en système est indispensable, à l'échelle du réseau électrique mais également du système énergétique dans son ensemble car les complémentarités entre les différents vecteurs énergétiques sont de plus en plus fortes.

Annexe 3 : résumé du rapport sur la mobilité bas-carbone

1. OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE

L'objectif de neutralité climatique d'ici 2050 implique une décarbonation rapide du secteur des transports. La figure 1 qui se limite au CO₂, montre que le transport représente 22 % des émissions mondiales, 29 % des émissions européennes, et 41 % des émissions françaises. Si le chiffre est aussi élevé pour la France, c'est notamment parce que le secteur électrique y est très décarboné et que la part de l'industrie dans la production nationale s'est réduite.

Figure 1 : part du transport dans les émissions de CO₂ à différentes échelles géographiques



Note : * Y compris cogénération et autoproduction.

Source : extrait des chiffres clé du climat 2022, SDES, Datalab, décembre 2021 ; AIE, 2022

- Parmi les leviers identifiés, la transition des véhicules vers des motorisations électriques, moins émettrices de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie, est une des transformations essentielles pour y arriver.
- Elle permet également d'apporter des gains en matière de qualité de l'air car les véhicules électriques n'émettent pas de polluants atmosphériques à l'échappement.
- Des discussions sont en cours au niveau de l'Union européenne afin de fixer un objectif de fin de vente des véhicules légers neufs thermiques d'ici 2035.
- La stratégie nationale bas-carbone (SNBC) prévoit la décarbonation du parc de véhicules légers par une trajectoire d'évolution des ventes vers les véhicules électriques. La SNBC est en cours de révision, afin de prendre en compte notamment les nouveaux objectifs climatiques européens.
- Le développement des véhicules électriques est en forte croissance au niveau mondial et va continuer à s'accélérer dans les prochaines décennies. L'Europe fait partie des leaders avec 1,4 million de véhicules électriques vendus, soit 43 % du marché mondial des véhicules électriques en 2020. L'AIE prévoit 25 millions de véhicules électriques vendus en 2030 pour un stock de 140 en circulation à cet horizon, sur un total de près de 2 milliards.
- La France fait partie des trois plus grands marchés européens de véhicules électrifiés (avec l'Allemagne et le Royaume-Uni), avec environ 108 700 immatriculations de voitures électriques et 70 600 immatriculations de voitures hybrides rechargeables sur les sept premiers mois de l'année 2022. Cela représente une part de marché d'environ 20 % (dont 8 % de véhicules hybrides rechargeables), proche du niveau du Royaume-Uni et de l'Allemagne mais inférieure à celles des pays nordiques (Norvège, Suède, Pays-Bas et Danemark) comprises entre 35 % et 90 %. Fin 2022, le parc de véhicules légers français devrait atteindre un million de véhicules électrifiés.

2. SOUTIEN À L'ACQUISITION DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

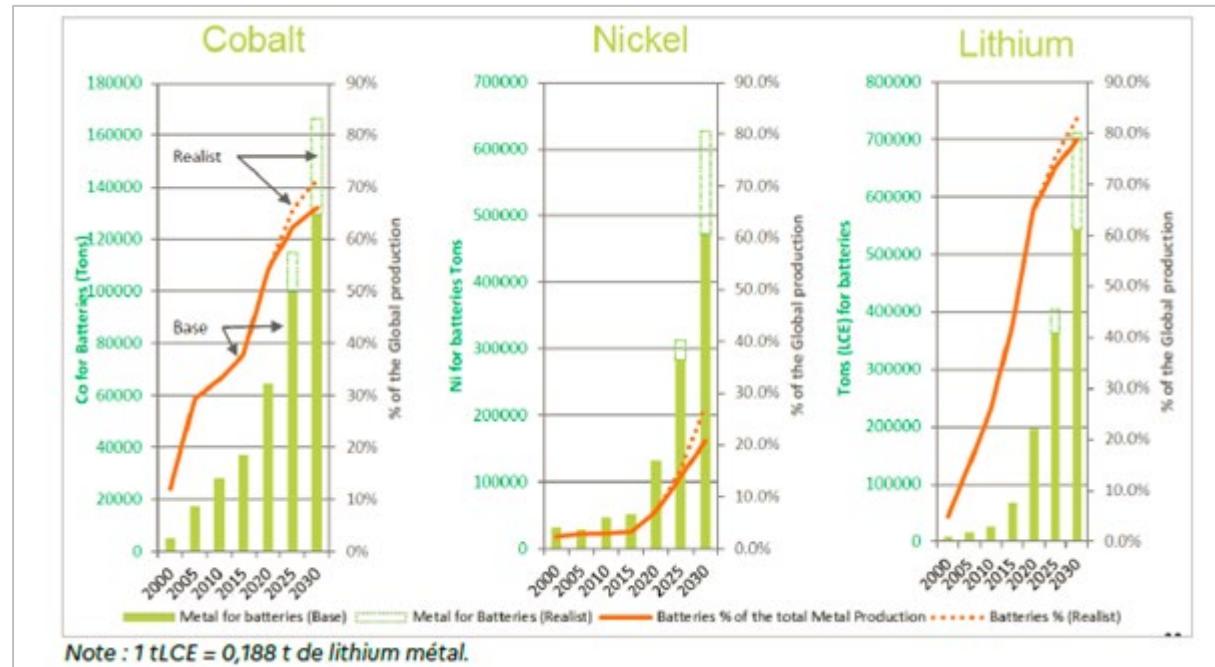
- Le gouvernement soutient cette transition du parc avec des aides à l'acquisition des véhicules électriques. Le bonus permet d'aider l'acquisition de véhicules électriques, à hauteur de 6 000 € pour une voiture, 7 000 € pour une camionnette, 30 000 € pour un bus ou un car et 50 000 € pour un poids lourd.
- La prime à la conversion, conditionnée à la mise au rebut d'un vieux véhicule polluant (voiture ou camionnette classée Crit'Air 3 ou davantage), peut atteindre 5 000 € pour les ménages modestes, et 9 000 € pour les camionnettes.
- Un dispositif de microcrédits permet, depuis 2021, de faciliter l'accès des ménages privés d'accès au réseau bancaire classique à des véhicules moins émetteurs.
- Depuis cette année, un appel à projets vise à soutenir l'acquisition de véhicules lourds électriques et l'installation de l'infrastructure de recharge associée. Le montant de l'aide pour le véhicule peut atteindre 65 % de l'écart de coût d'acquisition entre le véhicule électrique et un véhicule diesel équivalent (jusqu'à 150 000 €). L'installation des infrastructures de recharge est soutenue à hauteur de 60 % des coûts d'investissement.

3. ENJEUX LIÉS À LA FILIÈRE BATTERIE

À l'horizon 2030, les batteries lithium-ion devraient rester l'alternative la plus courante pour les véhicules électriques légers.

Ces batteries nécessitent des quantités importantes de matières premières (graphite, cobalt, nickel, manganèse et lithium en quantités variables). Comme l'indique la figure 2 ci-dessous, l'AIE prévoit une multiplication par au moins 10 des consommations de lithium, cobalt et nickel pour les batteries d'ici à 2030, et une augmentation d'un facteur au moins 7 pour le graphite et le manganèse. Des difficultés d'approvisionnement sont envisageables à cet horizon pour le cobalt et le nickel, notamment en raison de la concentration de leur production et de leur raffinage dans des zones géopolitiquement sensibles d'Afrique et d'Asie (par exemple : plus de 70 % du raffinage du cobalt et du nickel s'effectue en Chine).

Figure 2 : évolution de la demande en matériaux critiques pour les batteries à l'échelle mondiale



Source : Avicenne

4. L'EXTRACTION DE CES MATIÈRES PREMIÈRES ENTRAÎNE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

- Graphite : production très énergivore, fortes émissions de CO₂, rejets toxiques dans les pays les moins contraignants sur le plan environnemental (néanmoins des projets européens cherchent à limiter ces impacts, tout en améliorant les performances) ;
- Lithium : relativement abondant, production concentrée dans quelques zones géographiques (Amérique du Sud, Australie, Chine) et contrôlée par un nombre limité d'entreprises, conflits d'usage liés à l'eau dans les zones désertiques et donc d'acceptabilité sociale par les populations locales (mais de nombreux projets d'extraction sont en cours de développement à partir de procédés peu consommateurs d'eau, développés par des acteurs français) ;
- Nickel, cobalt : forte consommation d'énergie, rejet de déchets toxiques.

5. DES PERSPECTIVES SONT OFFERTES À MOYEN ET LONG TERME PAR LES EFFORTS DE R&D ET LE RECYCLAGE

- Des projets de R&D travaillent sur la réduction de la quantité de matières pour la production des batteries.
- Un autre volet sujet d'innovation est le développement de procédés de recyclage des batteries visant à produire des métaux de grade batterie, c'est-à-dire en capacité d'approvisionner la filière de production de batteries contribuant ainsi à réduire notre dépendance extérieure. Néanmoins, le recyclage des batteries ne permettra pas de couvrir la totalité des besoins en matières premières des industriels à court et moyen terme. En outre, il convient d'anticiper dès à présent l'arrivée de flux massifs de batteries usagées aux cours des prochaines années, et de mettre en place l'infrastructure industrielle et des réglementations qui permettront de valoriser ce gisement européen dans les meilleures conditions.
- Enfin, dans le cadre de l'élaboration de la feuille de route de décarbonation de l'automobile (prévue par l'art. 301 de la loi climat et résilience), la filière travaille sur l'identification de leviers pour réduire l'empreinte carbone de la production de véhicules, notamment des batteries, en augmentant le recours aux composants bas-carbone, le recyclage et la production locale.

6. UNE DIVERSITÉ D'ACTIONS PUBLIQUES ACCOMPAGNE CES ÉVOLUTIONS

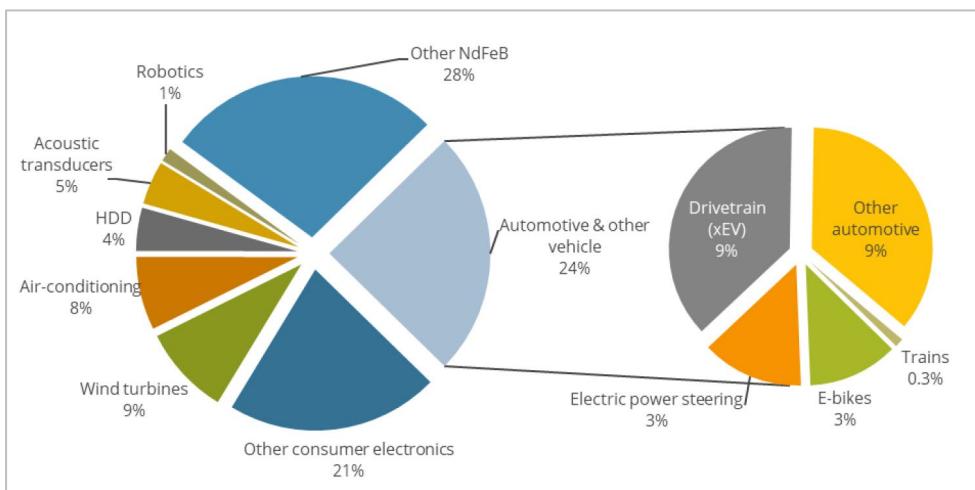
- Différents programmes de soutien à l'innovation, à l'industrialisation y compris pour le développement du recyclage : deux projets importants d'intérêt économique européen (PIIEC) permettent à la France de soutenir les industriels, complété par des appels à projets pour l'innovation y compris pour le recyclage que ce soit des déchets de production ou des déchets post-consommation (batteries usagées).
- Règlement européen sur les batteries, poussé par la présidence française de l'UE, qui impose des obligations de recyclage, de reincorporation de matières premières recyclées, la prise en compte du bilan carbone et un devoir de vigilance des fabricants et importateurs sur les risques sociaux et environnementaux liés aux matières premières
- À la suite du rapport Varin, projet de fonds destiné à sécuriser des investissements et création de l'Ofremi un observatoire français dédié aux métaux
- Préparation par la Commission européenne d'un projet législatif dédié aux matières critiques, afin de traiter de la question de sécurité d'approvisionnement

Annexe 4 : résumé du rapport sur l'éolien et les moteurs électriques

La transition bas-carbone entraîne une électrification de l'économie pour réduire la consommation de combustibles fossiles, fortement émetteurs de CO₂. Cela nécessite de produire de l'électricité à partir de sources décarbonées et renouvelables, et pour le secteur du transport, de pouvoir convertir cette électricité en énergie mécanique pour mettre en mouvement des véhicules électriques. Génératrices éoliennes et moteurs électriques sont justement les machines électriques qui permettent la conversion entre énergie mécanique et énergie électrique. Ces machines diffèrent par le sens de la conversion d'énergie, mécanique vers électrique pour une génératrice et inversement pour les moteurs. Leurs principes de fonctionnement et leur composition en matières sont toutefois similaires. Si de nombreuses technologies de machines électriques existent, toutes utilisent des bobinages en cuivre. Dans certains cas une partie de ces bobines est remplacée par des aimants permanents à terres rares, qui permettent par leurs propriétés magnétiques de réduire le poids et la complexité des machines électriques et d'améliorer leurs performances, ce qui explique leur usage dans les technologies de pointe.

L'éolien et la mobilité bas-carbone sont d'ores et déjà d'importants consommateurs d'aimants permanents à terres rares, avec respectivement 9 % et 24 % du total du marché mondial (figure 1).

Figure 1 : applications des aimants permanents en 2019 au niveau mondial



Sources : BRGM ; CRM factsheets 2020

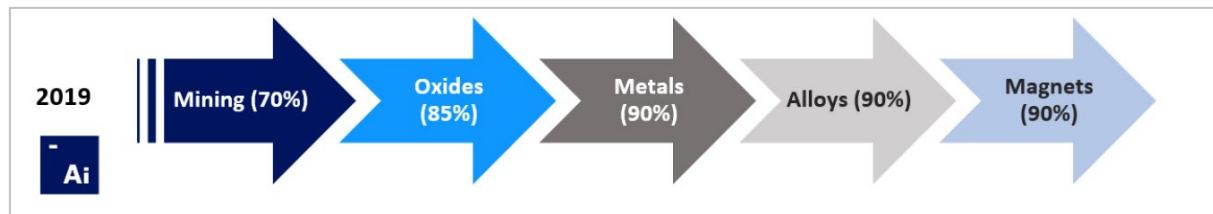
La forte croissance de ces marchés, de plus de 10 % par an au niveau mondial, est indispensable à la transition bas-carbone, mais va augmenter considérablement la demande pour les terres rares qui sont nécessaires à leur production et risque de se heurter à une offre limitée en terres rares. La demande mondiale en terres rares pour les moteurs de véhicules électriques pourrait ainsi être multipliée par dix d'ici à 2030. Pour l'éolien, la demande pourrait être multipliée par trois, en raison notamment du recours à des éoliennes toujours plus grandes qui rendent plus profitable le recours aux aimants permanents. Les autres ressources minérales dont la consommation augmentera pour l'éolien et les moteurs électriques sont le béton, le cuivre et l'acier. Ces ressources ont été étudiées dans le rapport d'étape n°2 sur les réseaux électriques.

Les aimants permanents à terres rares utilisés pour l'éolien et la mobilité électrique, appelés aimants néodyme-fer-bore ou NdFeB, sont constitués de néodyme, de praséodyme, de dysprosium et de terbium. Néodyme et praséodyme sont des terres rares légères utilisées pour leurs propriétés magnétiques, tandis que dysprosium et terbium sont des terres rares lourdes et sont utilisées pour étendre la plage thermique de ces propriétés magnétiques. Il n'existe actuellement pas d'alternatives ou de produits de substitution à performances équivalentes, mais des améliorations incrémentales permettent de réduire l'usage de terbium et de dysprosium, qui sont les terres rares les plus rares et chères.

La chaîne de valeur de la production des aimants se décompose en plusieurs étapes, qui sont étudiées dans le rapport. La première est l'extraction des terres rares dans des mines. Suivent ensuite le raffinage, la production de métaux de terres rares, la métallurgie d'alliages magnétiques et enfin la production d'aimants permanents.

Comme le montre la figure 2, la Chine est l'acteur dominant sur chacune de ces étapes, mais sa domination est la plus forte à partir de l'étape de raffinage. Plus de 85 % des capacités mondiales de raffinage puis de production d'aimants permanents sont ainsi situées en République populaire de Chine. Les centres industriels sont dominés par des entreprises publiques largement intégrées verticalement, de la mine de terres rares à la production d'aimants permanents. Le marché des terres rares et les industries qui en dépendent sont donc fortement sensibles aux décisions des acteurs publics et industriels chinois.

Figure 2 : domination de la Chine sur chaque étape de la chaîne de valeur des aimants permanents



Sources : Adamas Intelligence ; CRM Factsheet 2020

Depuis la fin des années 2010, des projets de mines de terres rares et d'usines de raffinage sont lancés dans plusieurs pays occidentaux, notamment en Australie et en Amérique du Nord. Si de nombreux sites contiennent des terres rares, avec une proportion variable de terres rares lourdes mais souvent faible, peu d'entre eux peuvent être exploités de façon viable économiquement. En effet, la concentration en terres rares est très variable, et parmi les dix-sept éléments constitutifs du groupe des terres rares, ce sont les terres rares lourdes ainsi que le néodyme et le praséodyme qui ont le plus de valeur.

En Europe, plusieurs sites prometteurs sont identifiés en Scandinavie et au Groenland, mais leur éventuelle exploitation n'interviendra pas avant plusieurs années. C'est pourquoi le recyclage des aimants usagés est à court terme la principale piste afin de développer une industrie européenne de production d'aimants permanents qui permettrait de réduire la dépendance de l'Union européenne aux importations.

La France n'a pas de potentiel minier pour les terres rares, mais bénéficie d'autres atouts, puisque plusieurs entreprises françaises développent de nouveaux procédés de recyclage d'aimants permanents qui réduisent les impacts environnementaux des traitements. Ces entreprises s'appuient sur les compétences des entreprises françaises qui ont dominé la métallurgie des terres rares dans les années 1970 et 1980. Le développement de cette filière du recyclage dépend de la capacité à orienter les aimants permanents usagés vers les recycleurs, et ainsi éviter leur export.

Les acteurs français doivent saisir les opportunités de s'intégrer dans des chaînes de valeur européennes qui se constituent sous l'impulsion du cluster *Rare Earth Magnets and Motors de l'European Raw Materials Alliance*. Cette association regroupe plus de 450 membres, notamment industriels, académiques et gouvernementaux, et cherche à sécuriser une partie des besoins européens en terres rares et en aimants permanents à partir du recyclage d'abord, puis des projets miniers émergents sur le continent.

La croissance exponentielle du marché de l'éolien et de la mobilité bas-carbone doit s'accompagner d'un horizon d'investissement le plus stable et le plus prévisible possible pour les industriels utilisateurs d'aimants permanents, notamment les fabricants de turbines et les entreprises du secteur automobile. En effet, les fortes opportunités offertes par les politiques publiques volontaristes de soutien à ces technologies ont incité les industriels à investir dans de nouvelles capacités de production. Cependant, la viabilité de ces investissements, qui repose sur le déploiement de forts volumes au cours des prochaines années, pourrait être fragilisée en cas de retournement de marché ou de retards par rapport aux scénarios établis par les pouvoirs publics.

L'éolien en mer, particulièrement l'éolien flottant, concentre les principales opportunités de retombées industrielles dans ce domaine sur le territoire français. De nombreuses entreprises françaises peuvent ainsi valoriser leur expertise du milieu marin, héritée des projets d'aménagement portuaires et de l'extraction pétrolière et gazière, et faire de la France un acteur majeur de la filière émergente de l'éolien flottant. Le démantèlement des éoliennes en fin de vie constitue également un marché émergent qui offre des opportunités en France. Par ailleurs, les changements profonds qu'implique l'électrification de la mobilité vont bouleverser l'ensemble des acteurs de l'industrie automobile. Ces bouleversements peuvent permettre la réinternalisation et la relocalisation de certaines étapes de production, mais également menacer les emplois dans la chaîne de valeur des moteurs thermiques.

Les impacts environnementaux de l'extraction des terres rares sont principalement causés par les étapes de raffinage et les traitements engendrent parfois le rejet de composés radioactifs. Néanmoins, les tonnages traités annuellement sont faibles et contraints par des quotas en Chine.

Principales références

- Ademe, 2021, Marchés et emplois concourant à la transition énergétique dans le secteur des énergies renouvelables et de récupération.
- Ademe, 2020, État de l'art des impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages, et des moyens d'évaluation de ces impacts.
- AIE, 2021, *Renewables 2021 - Analysis and forecasts to 2026*.
- Alves Dias, P., Bobba, S., Carrara, S., Plazzotta, B. (2020), *The role of rare earth elements in wind energy and electric mobility*, EUR 30488 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-27016-4, doi:10.2760/303258, JRC122671.
- Arendt R. and al., 2022, *Environmental costs of abiotic resource demand for the EU's low-carbon development*, Elsevier Resources, Conservation and Recycling, Elsevier, volume 180, 106057.
- Bihouix, P., 2014, *L'âge des low-tech. Vers une civilisation techniquement soutenable*, Collection Anthropocène, Ed. Seuil.
- BRGM, 2021, *Évolution Base de données « Gisements France » : Atlas des substances critiques et stratégiques* - Rapport final.
- Carrara S., Alves Dias P., Plazzotta B. and Pavel C., *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system*, EUR 30095 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-16225-4, doi:10.2760/160859, JRC119941.
- Criqui, Patrick, et Henri Waisman. « Prospective des transitions énergétiques. Entre modélisation économique et analyse des scénarios stratégiques », *Futuribles*, vol. 438, no. 5, 2020, pp. 29-48.
- D'Hugues P., Christmann P. et Christophe D., 2022. *Mine responsable : est-ce possible ?*, dans *Métaux critiques – concilier éthique et souveraineté ?*, Géosciences n° 26, juin 2022, pp. 48-53.
- Dehoust et al., 2020, Environmental Criticality of Raw Materials An assessment of environmental hazard potentials of raw materials from mining and recommendations for an ecological raw materials policy.
- Ernst Worrell_ M A Reuter - Handbook of recycling _ state-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists-Elsevier, 2014.
- Fondation pour la Recherche sur la biodiversité, *Énergie renouvelable et biodiversité : les implications pour parvenir à une économie verte*, octobre 2017.
- Emmanuel Hache, *La géopolitique des énergies renouvelables : amélioration de la sécurité énergétique et / ou nouvelles dépendances ?* Revue internationale et stratégique 2016/1 (n° 101), p.36-46. doi 10.3917/ris.101.0036

- European Commission (2021). *Critical raw materials for the EU*.
- Fizaine, F. et Court, V.(2014), *Épuisement des métaux et énergie nette dans une perspective de transition énergétique*, Florian Fizaine et Victor Court, Chaire d'économie du climat, Paris-Dauphine.
- Forests&Finance (avril 2022) *Les conséquences de l'exploitation minière sur l'Amazonie brésilienne*.
- *Global EV Outlook 2020*, Agence Internationale de l'Énergie.
- JRC, 2020, *Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study*.
- Laura J. Senter and al., 2020, *Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity*, Nature communications 11, article number : 4174.
- LPO, 2019, *Éoliennes et biodiversité : synthèse sur les connaissances sur les impacts et les moyens de les atténuer*, Office national de la chasse et de la faune sauvage/LPO, 120p.
- Nuss P. and M.J. Eckelman, 2014, Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis, journal Plos One, volume 9
- OECD, 2021, *OECD Economic Surveys: France 2021*, OECD Publishing, Paris.
- Pavel, C. C., Lacal-Arántegui, R., Marmier, A., Schüler, D., Tzimas, E., Buchert, M., ... Blagoeva, D., 2017, *Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines*. Resources Policy, 52, 349–357. doi:10.1016/j.resourpol.2017.04.010
- RTE, 2021, *RTE-2050, chapitre 12, L'analyse environnementale*
- Schmid M., 2019, *Mitigating supply risks through involvement in rare earth projects: Japan's strategies and what the US can learn*
- Seck, G.S., Hache, E., Simoën, M., Bonnet, C., Carcanague S., 2020, *Copper at the crossroads: Assessment of the interactions between low-carbon energy transition and supply limitations*, Resources, Conservation & Recycling, 163, December.
- Smith D. and Wentworth J., 2022, *Mining and the sustainability of metals*, UK Parliament Post.
- *Study on the EU's list of Critical Raw Materials*, 2020, *Critical Raw Materials Factsheets (Final)*.
- *USGS 2021 - Mineral commodity summary*.

Glossaire, abréviations et sigles

ACV	Analyse de cycle de vie
AIE	Agence internationale de l'énergie
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
Co	Cobalt
Cu	Cuivre
DMA – drainage minier acide	Le drainage minier acide (DMA) ou encore drainage rocheux acide (DRA) est un phénomène de production d'une solution minérale acide qui s'écoule régulièrement, suite à une production d'acide sulfurique induite par la mise en contact avec l'air de certains minéraux (sulfures métalliques), généralement à l'occasion de grandes excavations (carrières) et travaux miniers ou de stockage de déchets miniers
eq/t	Équivalent par tonne
EROI	<i>Energy Return On Investment</i> ou taux de retour énergétique
ESS	Économie sociale et solidaire
GES	Gaz à effet de serre
JRC	<i>Joint Research Center</i> (Centre commun de recherche), laboratoire de recherche scientifique et technologique de l'Union européenne
IPCEI, PIEEC	<i>Important Projects of Common European Interest</i> – Projet important d'intérêt européen commun
kgCO₂-eq	En équivalent kilogrammes de CO ₂
kt	Milliers de tonnes
Mt	Millions de tonnes
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
Ofremini	Observatoire français des ressources minérales
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
REP	Responsabilité élargie des producteurs
Réserves (géologiques)	Les réserves se distinguent des ressources minérales par le fait qu'elles ont été identifiées et sont considérées comme économiquement exploitables. L'estimation des réserves se fait sur la base de critères économiques (cours des métaux, taux de change, etc.), de contraintes commerciales et environnementales mais aussi des techniques d'exploitation et de traitement
Ressources (géologiques)	Les ressources correspondent à une minéralisation dont l'enveloppe et le volume ont fait l'objet de premières estimations, à l'aide de sondages, de petits travaux miniers, de prospection en surface et/ou d'observations indirectes par géochimie, géophysique, etc. Les ressources sont qualifiées de « inférées », « indiquées » et « mesurées » par ordre de précision croissante obtenue en fonction de la quantité et du détail des travaux réalisés
RSE	Responsabilité sociétale des entreprises
RTE	Réseau de transport d'électricité
TR	Terres rares, notamment néodyme, praséodyme, dysprosium, terbium, etc.
USGS	<i>US geological survey</i> , institut d'études géologiques des États-Unis

TABLE DES MATIÈRES

RAPPEL DU CONTEXTE	10
INTRODUCTION	12
I. Les chaînes de valeur de la transition bas-carbone.....	13
A. L'extraction des ressources et les premières transformations.....	17
1. Techniques et procédés	17
2. Déterminants économiques	20
3. Impacts environnementaux et sociaux.....	22
a) Impacts environnementaux.....	22
b) Impacts sociaux	24
B. La purification et la transformation des matières : la métallurgie et la chimie	26
1. Principaux procédés	26
a) La pyrométallurgie.....	26
b) L'hydrométallurgie	26
c) L'électrométallurgie	28
2. Déterminants économiques	28
3. Impacts environnementaux	29
C. L'intégration et l'exploitation des technologies.....	31
1. Les énergies renouvelables et les réseaux électriques	31
2. La mobilité bas-carbone	33
3. Impacts environnementaux	35
a) Émissions de gaz à effet de serre (GES)	35
b) Atteintes à la biodiversité.....	36
c) Occupation des sols/consommation d'espaces/artificialisation	37
d) Conflits d'usages.....	38
e) Impacts paysager et visuel, et acceptabilité sociale.....	38
D. Le recyclage	40
1. La filière du recyclage.....	40
2. Enjeux réglementaires et environnementaux du recyclage.....	42
II. Les risques d'approvisionnement des chaînes de valeur des technologies bas-carbone.....	43
A. Les méthodes d'analyse des risques : criticité, projections et prospectives.....	44
1. Études de criticité	44
2. Projections et prospectives : explorer les futurs possibles pour élaborer des stratégies à long terme.....	48
a) Prospectives systémiques à l'échelle de la France : <i>Transition(s) 2050</i> de l'Ademe et <i>Futurs énergétiques 2050</i> de RTE	48
b) L'étude Capgemini pour l'Institut national de l'économie circulaire : un premier chiffrage métal de la SNBC	50
c) Au niveau européen : une prospective qui combine analyse de tendances et étude de criticité	51
d) Les modèles mondiaux de prospective « énergie - ressources minérales » pour simuler des scénarios à l'horizon 2050	51
B. Hausse de la demande et usages concurrents	54
1. Une demande énergétique mondiale en hausse tendancielle, mais qui devra nécessairement baisser pour respecter les objectifs climatiques	54
a) Scénarios de l'AIE	54
b) L'efficacité énergétique et les technologies bas-carbone seront-elles suffisantes ? La question de la sobriété	55

2. Des besoins en ressources minérales en forte hausse pour assurer la transition bas-carbone	59
a) Le photovoltaïque	60
b) Les réseaux électriques et l'hydrogène	61
c) Les batteries lithium-ion.....	63
d) Éolien et moteurs électriques	64
C. Risques techniques relatifs à l'offre : géologie, développement minier et recyclage	67
1. La disponibilité géologique et les coproduits.....	67
2. Le temps de développement et les risques des nouveaux projets.....	70
3. Le recyclage	73
D. Risques économiques et politiques	75
1. La concentration de la production et les risques associés : transport et géopolitique.....	75
2. Commerce international et politiques industrielles.....	77
3. Financiarisation des marchés des métaux et risque-prix	80
E. Risques environnementaux et sociaux	83
1. Risques environnementaux	84
a) Évaluation globale des risques environnementaux de la transition bas-carbone	84
b) Les risques liés à l'eau peuvent contraindre la production minière	85
c) Risques liés aux impacts sur les écosystèmes et biodiversité.....	86
2. Risques sociaux.....	87
III. Politiques publiques et recommandations.....	91
A. Les politiques françaises et européennes.....	92
1. Les politiques françaises	92
2. Les politiques européennes	94
B. Recommandations	96
1. Vision, objectifs et leviers.....	96
a) Enjeux	96
b) Objectifs.....	96
c) Leviers et axes d'action	97
2. Recommandations transversales	99
3. Recommandations issues des rapports thématiques	109
Annexes : résumés des rapports thématiques du plan de programmation des ressources de la transition bas-carbone	111
Annexe 1 : résumé du rapport sur le photovoltaïque.....	112
Annexe 2 : résumé du rapport sur les réseaux et stockage électriques	115
Annexe 3 : résumé du rapport sur la mobilité bas-carbone.....	119
Annexe 4 : résumé du rapport sur l'éolien et les moteurs électriques	122
Principales références	125
Glossaire, abréviations et sigles	127

Listes des figures, encadrés et tableaux

Figure 1 : mine de cuivre à ciel ouvert, Escondida (Chili).....	17
Figure 2 : coupe transversale illustrant les différents modes d'exploitation minière	18
Figure 3 : schéma d'exploitation par lixiviation <i>in situ</i>	19
Figure 4 : machines de traitement du minerai de la mine de Kylylahti (Finlande, et contenant notamment cuivre, nickel et cobalt)	20
Figure 5 : procédés de production des cathodes de cuivre.....	27
Figure 6 : répartition des emplois dans le secteur des énergies renouvelables et de récupération en 2019	32
Figure 7 : taille des marchés des énergies renouvelables et de récupération et répartition des emplois par sous-segment.....	32
Figure 8 : projection du nombre de véhicules électriques à 2030.....	33
Figure 9 : carte des projets de gigafactories en Europe.....	34
Figure 10 : émissions en cycle de vie pour différentes filières aujourd'hui (émissions directes et indirectes)	35
Figure 11 : étapes de la chaîne de recyclage et taux d'efficacité illustratifs pour les métaux	40
Figure 12 : évaluation de la criticité des substances étudiées par le BRGM depuis 2010	45
Figure 13 : fréquence d'apparition des matériaux dans les évaluations de criticité et détermination de leur niveau de criticité.....	47
Figure 14 : besoins matières des petits matériaux et métaux moyens annuels pour les scénarios en tonnes/an.....	49
Figure 15 : besoins matières annuels moyens de la France entre 2020 et 2050 rapportés à la production mondiale 2020 pour 10 matériaux et métaux	50
Figure 16 : comparaison entre la production cumulée de cuivre primaire jusqu'en 2050 selon deux scénarios climatiques et le cuivre identifié et non découvert dans le monde en 2013	52
Figure 17 : scénarios énergétiques de l'AIE en 2030 et 2040	55
Figure 18 : projection de la demande mondiale en ressources minérales dans les principaux scénarios de la transition bas-carbone	59
Figure 19 : comparaison des intensités en certains métaux technologiques de plusieurs familles de technologies de transport et de production d'énergie.....	60
Figure 20 : croissance de la demande mondiale pour le cuivre, le silicium et l'argent destinés au photovoltaïque selon les scénarios considérés.....	61
Figure 21 : croissance de la demande en cuivre et aluminium pour les réseaux électriques au niveau mondial selon différents scénarios.....	62
Figure 22 : comparaison de la demande annuelle des besoins matières pour la flotte de véhicule électrique en 2030 avec la consommation actuelle (2019).....	63
Figure 23 : évolution de la demande en ressources minérales pour l'éolien selon les scénarios	64
Figure 24 : demande mondiale en terres rares pour aimants permanents à destination des technologies bas-carbone	65
Figure 25 : évolution de la production minière, des réserves et années d'épuisement théorique pour le cuivre.....	67
Figure 26 : évolution de la teneur moyenne d'un gisement et des tonnages de ressources en fonction de la teneur de coupure retenue	69
Figure 27 : évolution de la consommation d'énergie de différentes étapes de la production de métaux.....	70
Figure 28 : principaux bassins minéraux européens, et métaux de base et en métaux critiques présents (sans préjuger de leur exploitabilité).....	71
Figure 29 : taux d'entrée de recyclage en fin de vie (EOL-RIR) pour l'UE-28 sur la base des études MSA (lorsque disponible) et utilisé pour dresser la liste 2017 des matières premières critiques pour l'UE	73
Figure 30 : indice des prix du transport maritime de janvier 2020 à juin 2022	76
Figure 31 : importance de la production de certains minéraux par pays.....	78
Figure 32 : balance commerciale française du secteur des énergies renouvelables.....	79
Figure 33 : budgets d'exploration et indice des prix des métaux non ferreux.....	81
Figure 34 : 86 problématiques de l'industrie minière.....	83
Figure 35 : volume des métaux utilisés et leur part dans le coût environnemental total	84
Figure 36 : exposition de la production mondiale de cuivre au stress hydrique	85
 Encadré 1 : technologies de la chaleur.....	15
Encadré 2 : les besoins en ressources minérales de la filière nucléaire	16
Encadré 3 : exemple de la métallurgie du cuivre	27
Encadré 4 : quelques exemples de la nouvelle <i>low-tech</i> appliquée à la mobilité	57
Encadré 5 : décroissance de la teneur moyennes des gisements : vers la fin des gisements à haute teneur ?	68
Encadré 6 : le rapport annuel de Volkswagen sur l'approvisionnement responsable en ressources minérales	89
 Tableau 1 : liste des substances étudiées dans le cadre du plan ressources	14
Tableau 2 : structure de la chaîne de valeur des modules cristallins.....	113

Photos de couverture :

Parc éolien offshore (Crédit : Thomas G / Pixabay)

Pylônes électriques THT en sortie du CNPE de Chinon (Crédit : Arnaud Bouissou / Terra)

Chantier de pose des panneaux photovoltaïques dans le parc solaire TIPER 1

(Crédit : Arnaud Bouissou / Terra)

Véhicule électrique Renault Kangoo ZE (Crédit : Arnaud Bouissou / Terra)

Coordination éditoriale : Laurianne Courtier

Mise en page : www.labouteaverbe.fr



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉNERGÉTIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Commissariat général au développement durable

Service de l'économie verte et solidaire
Sous-direction de l'économie et de l'évaluation
Tour Séquoia - 92055 La Défense cedex
Courriel : diffusion.cgdd@developpement-durable.gouv.fr

www.ecologie.gouv.fr