

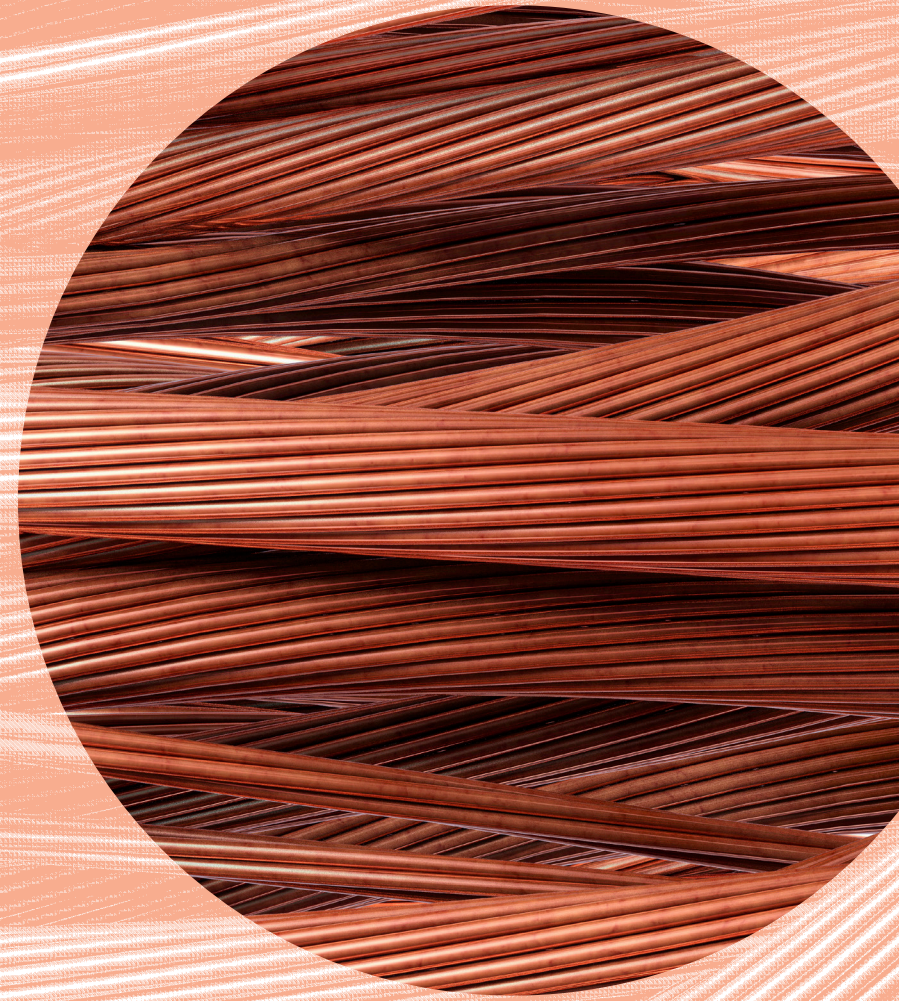
TRANSITION(S) 2050

CHOISIR MAINTENANT
AGIR POUR LE CLIMAT

Feuilleton

Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique

Une analyse des principaux matériaux
et métaux nécessaires au déploiement
des EnR électriques et des véhicules



Ce document est édité par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Retrouvez les scénarios ADEME en ligne sur www.transitions2050.ademe.fr

Crédits photo: Getty Images

Conception éditoriale et graphique: bearideas

Rédaction: Marie Sauze et Stéphane Barbusse

Brochure réf. 011761

ISBN: 979-10-297-1945-5

Dépôt légal: © ADEME Éditions, février 2022

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L. 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L. 122-10 à L. 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

SOMMAIRE

1. Transition(s) 2050 : quels besoins en matériaux et métaux pour les grandes technologies de la transition énergétique ?
4
2. Les messages clés
6
3. Une estimation des besoins en matériaux et métaux contrainte par de nombreuses limites
8
4. Quelle consommation unitaire des technologies ? Les filières de la transition utilisent les matériaux différemment
10
5. Quels besoins à l'horizon 2050 ? Les véhicules utilisent plus de métaux stratégiques que les EnR dans tous les scénarios
21
6. Comparaison avec la situation actuelle
28
7. Un travail d'estimation à affiner
35
8. Annexe : généralités et problématiques des matériaux et métaux pour certaines technologies de la TE
36
9. Références bibliographiques
38

1. Transition(s) 2050 : quels besoins en matériaux et métaux pour les grandes technologies de la transition énergétique ?

Afin d'alimenter les débats de l'élection présidentielle de 2022 et ceux de la future Stratégie française énergie-climat (SFEC), l'ADEME a publié en novembre 2021 un exercice de prospective inédit, présentant, *via* quatre scénarios de société volontairement contrastés, quatre chemins vers une France neutre en carbone en 2050 [1]. Ces scénarios explorent les aspects sociétaux, énergétiques et climatiques des grands sous-systèmes impliqués dans ces changements : bioéconomie-alimentation-agriculture-forêt-sols ; aménagement du territoire-bâtiments-mobilité ; industrie-matériaux-économie circulaire ; systèmes énergétiques décarbonés.

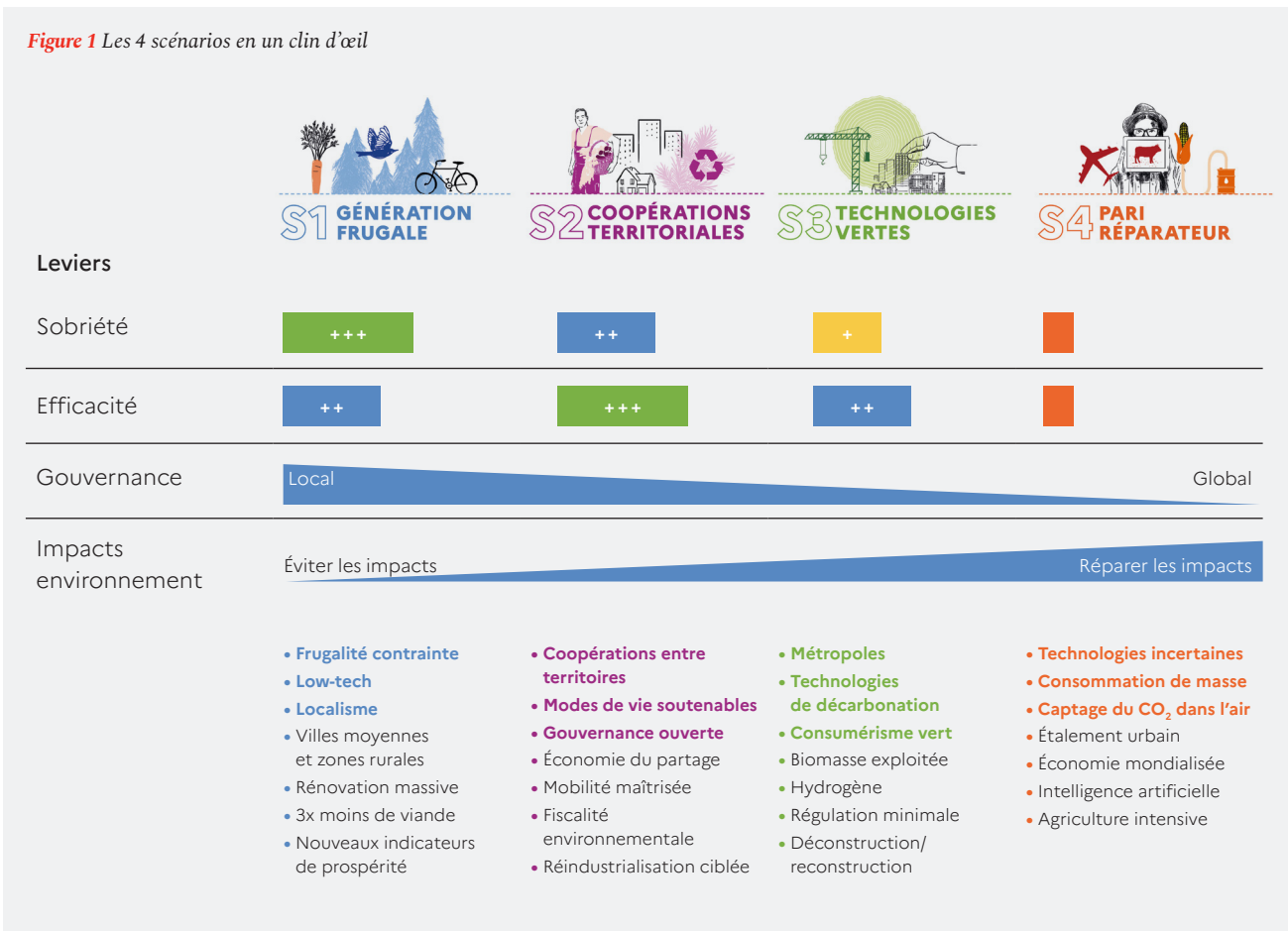
Chaque scénario est nourri par un récit, assumant la représentation du monde et les dimensions sociétales et politiques. Ces quatre scénarios se distinguent, d'un bout à l'autre du spectre par :

- **L'appel plus ou moins fort aux leviers de la sobriété** (S1-S2) et/ou de l'innovation par les technologies – efficacité (S2-S3) et décarbonation (S3-S4) ;
- **une gouvernance locale** (S1 et S2) à une société mondialisée (S4) en passant par une forte présence de l'État (S3) ;
- **des impacts environnementaux plus ou moins maîtrisés** (S1 à S4).

Les travaux déjà publiés par l'ADEME ont permis de dimensionner quatre systèmes énergétiques sous-jacents à ces scénarios, tous atteignant la neutralité carbone avec des recours assez contrastés aux différents vecteurs énergétiques et aux puits de carbone biologiques ou technologiques. Au-delà des enjeux énergétiques et climatiques, déjà bien traités, l'ADEME va publier dans le courant de l'année 2022 une analyse des besoins en matériaux des quatre scénarios incluant un calcul d'empreinte.

Le présent document vise, en amont de cette publication, à réaliser une analyse spécifique des besoins en métaux et principaux matériaux pour les technologies à fort potentiel de déploiement que sont les véhicules, les EnR électriques et le nucléaire. Cette analyse se justifie car certains matériaux et métaux peuvent s'avérer à enjeu concernant leur disponibilité, comme cela est explicité dans l'annexe « *Généralités et problématiques des matériaux et métaux pour les énergies renouvelables et les véhicules* ».

Figure 1 Les 4 scénarios en un clin d'œil



2. Les messages clés

L'ADEME a réalisé dans ce document une évaluation des **besoins bruts¹ des principaux matériaux et métaux nécessaires au déploiement des technologies de production d'électricité et des véhicules électriques** dans ses quatre scénarios Transition(s) 2050. Les besoins ont été évalués en valeur absolue sous forme d'une moyenne annuelle des besoins de la période 2020-2050, puis rapportés à la production française actuelle et enfin comparés à la production mondiale afin de les mettre au regard de la part de la France dans le PIB mondial (1 % actuellement), ce qui permet en première approche de qualifier le caractère plus ou moins critique de leur utilisation. Dans cette synthèse, l'ADEME distingue les matériaux utilisés en grande quantité (plus de 50 kt/an) soit le béton, le cuivre, l'aluminium et le verre que nous appellerons « grands matériaux et métaux », ceux utilisés dans de petites quantités (moins de 50 kt/an) que nous appellerons « petits matériaux et métaux ». Il ressort de l'analyse les principales conclusions suivantes :

Pour les « grands matériaux et métaux » : des consommations négligeables pour le béton, l'acier et le verre mais qui peuvent, pour l'aluminium et le cuivre des véhicules, contribuer de façon prédominante à l'augmentation des besoins français en 2050 (Graphique 1).

- La consommation moyenne annuelle sur les 30 ans de béton, principalement liée aux fondations des centrales photovoltaïques et de l'éolien, reste faible comparée à la production française, et, du fait de la baisse des consommations dans les autres secteurs de l'économie, la consommation totale évolue globalement à la baisse.
- De même, la consommation moyenne annuelle d'acier pour la transition énergétique, qui provient à 60 % des besoins de véhicules, est largement compensée par la baisse de consommation d'acier dans tous les secteurs de l'économie, si bien que la consommation globale baisse dans tous les scénarios, sauf dans S4.
- Pour le verre, la consommation moyenne annuelle pour la transition énergétique représente entre 2 % et 6 % de la consommation actuelle française. Sa consommation étant liée à 70 % au développement du photovoltaïque, elle croît de S1 à S4 dans la mesure où le parc installé augmente.
- Pour l'aluminium et le cuivre, dont l'utilisation est essentiellement le fait des véhicules dans cette

analyse (90 % pour l'aluminium et de 75 % pour le cuivre), les besoins représentent entre 25 % et 53 % de la consommation actuelle française pour l'aluminium et entre 18 % et 36 % pour le cuivre, mais viennent se substituer en partie à des consommations actuelles dans le secteur de l'automobile. Les quantités annuelles nécessaires croissent de S1 à S4 en lien avec les ventes de véhicules neufs et les évolutions de leurs caractéristiques (gabarit et technologie de traction). Il en résulte une évolution contrastée en fonction des scénarios : **pour l'aluminium, les consommations totales baissent dans S1 et S2, mais les besoins pour les véhicules contribuent majoritairement à l'augmentation de la consommation, de 55 % dans S3 et 88 % dans S4.** Le développement du recyclage de ces métaux peut cependant permettre une nette diminution de ces besoins.

Pour les « petits matériaux et métaux » : des approvisionnements à sécuriser en terres rares pour les éoliennes en mer et en matières pour les batteries des véhicules (lithium, cobalt, nickel et graphite) (Graphique 2).

- Pour l'ensemble des scénarios, les véhicules consomment davantage de nouveaux matériaux spécifiques à la transition énergétique (lithium, cobalt, graphite) que le déploiement du photovoltaïque, de l'éolien ou du nucléaire. Ceci reste à mettre au regard des technologies et des capacités de recyclage existantes et à développer.
- Concernant le silicium, l'argent et le titane, les consommations pour la transition énergétique restent inférieures à la part de la France dans le PIB mondial.
- Concernant les terres rares, certains éléments intervenants dans la fabrication des aimants permanents peuvent être plus critiques. En effet, sans même prendre en compte les besoins éventuels pour les moteurs de traction des véhicules, le besoin français pour les éléments néodyme, praséodyme et dysprosium en 2050 (pour 47 GW d'éolien en mer) pourrait représenter à lui seul 1,7 % de la production actuelle mondiale de ces éléments, ce qui s'avère supérieur à la part de la France dans le PIB mondial. Il est donc important que les fabricants poursuivent leurs efforts de substitution de ces éléments dans les génératrices d'éoliennes en mer et les moteurs des véhicules.

¹ Sans prise en compte du recyclage.

- Les besoins annuels en métaux (lithium, cobalt, nickel) et graphite des batteries des véhicules, augmentent également au-delà de notre part dans le PIB mondial : jusqu'à environ 3 % pour cobalt, nickel et graphite et jusqu'à 10 % pour le lithium. Pour faire face à cette criticité potentielle, le soutien à la recherche pour favoriser le recyclage des batteries en fin de vie est indispensable².

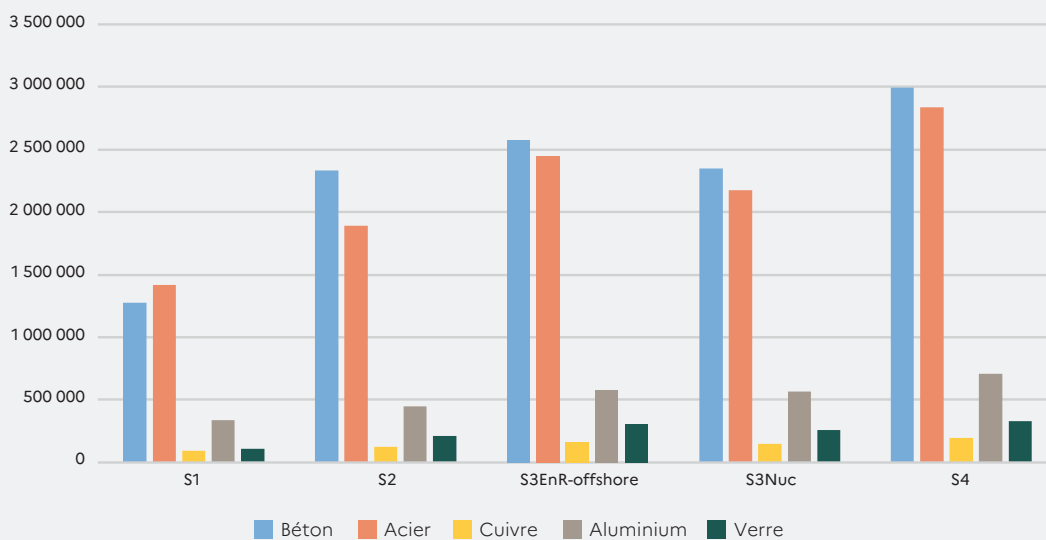
Dans la logique d'une industrialisation en France des composants qui utilisent le cobalt, le lithium, le graphite, le cuivre et les terres rares pour la filière des véhicules, il serait important de mettre en place des stratégies adéquates soit en fiabilisant les importations soit en développant une diplomatie des métaux en lien avec des partenaires européens au travers de contrats sécurisés d'approvisionnement ou de prise de participation dans des industries minières. Cette stratégie pourrait se faire en parallèle

d'une relocalisation de certaines productions et du développement du recyclage.

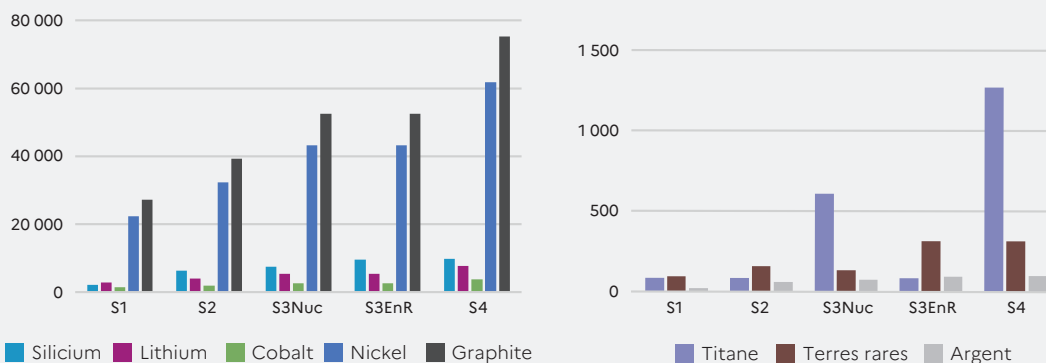
Pour le nucléaire, le manque de disponibilité de données publiques sur les intensités matières ne permettent pas de conclure sur la disponibilité de l'offre des différents matériaux requis, ni de comparer les besoins annuels avec ceux des autres filières.

Ces résultats ne tiennent pas compte des évolutions technologiques qui permettraient de diminuer la demande pour tel ou tel matériau ou métal ou à l'inverse, faire apparaître des besoins nouveaux pour un autre métal. De même, les performances du recyclage peuvent également diminuer la demande en matières premières vierges au profit des matières premières de récupération. Les principales limites aux conclusions sont exprimées dans la **section suivante**.

Graphique 1 Besoins annuels en grands matériaux et métaux en tonnes pour les différents scénarios



Graphique 2 Besoins annuels en petits matériaux et métaux en tonnes pour les différents scénarios



² Voir Lettre ADEME recherche de janvier 2022 : <https://infos.ademe.fr/article-recherche/lademe-soutient-linnovation-pour-ameliorer-le-recyclage-et-la-reincorporation-des-materiaux/>.

3. Une estimation des besoins en matériaux et métaux contrainte par de nombreuses limites

L'exercice d'estimation permet d'avoir des ordres de grandeurs des besoins moyens annuels pour certaines infrastructures énergétiques, avec cependant quelques limites importantes :

- la disponibilité des données et leur représentativité. En effet, l'étude SURFER [2] a montré une grande hétérogénéité dans la disponibilité des données de base, dans la qualité des références utilisables et dans le nombre de références très variables suivant les technologies. Cette hétérogénéité diminue la fiabilité des comparaisons réalisées ;
- l'état actuel des connaissances. Les technologies évoluent et l'innovation dans les procédés de fabrication modifie les besoins matières avec à la clé des besoins qui souvent diminuent en particulier dans les technologies des EnR³ ;
- le fait que les matières sont généralement mobilisées et pas consommées, c'est le cas des minéraux et des métaux notamment. Pour la plupart des technologies des filières EnR, les matières mobilisées restent majoritairement accessibles pour être réutilisées ou recyclées et permettent d'envisager un usage à long terme pour reconstituer, rénover et pérenniser les mêmes infrastructures énergétiques ou d'autres. C'est le cas également pour des matériaux comme l'acier ou l'aluminium pour les véhicules. Or, les bénéfices du recyclage, qui ne sont pas égaux pour toutes les matières et dans l'ensemble des filières, ne sont pas mesurés ;
- le fait que l'estimation des besoins en matières n'apporte pas une vision complète des impacts environnementaux, notamment sur la biodiversité, les sols et les paysages. Les résultats de ce travail ne permettent donc pas d'évaluer directement l'ensemble des impacts environnementaux des différents systèmes de production énergétique sur leur cycle de vie, bien qu'un lien fort existe entre extractions des matières premières et impacts environnementaux ;
- les besoins matières considérés sont uniquement les besoins directs, c'est-à-dire les matières immobilisées dans la structure et non les matières nécessaires sur l'ensemble du cycle de vie. Les besoins matières liés aux procédés d'extraction/purification, transport, fabrication, démantèlement et gestion des matières ultimes ne sont pas estimés. Pour le nucléaire, l'uranium en tant que combustible est cependant ajouté à ces besoins directs ;
- les besoins en matières ou matériaux pour les technologies de production d'EnR thermiques, des combustibles liquides et des gaz renouvelables (hydrogène⁴, méthane⁵), ou d'autres capacités de production d'électricité (hydroélectrique, turbine à gaz, biomasse...) n'ont pas été évalués, bien qu'en 2050 ces technologies couvrent généralement plus de 50 % de la demande finale énergétique dans tous les scénarios ;
- les besoins en matières ou matériaux liés à la numérisation des réseaux d'énergies (électricité, gaz, chaleur/froid, carburants/combustibles liquides) n'ont pas été évalués, bien qu'en 2050 ces technologies soient essentielles pour les gérer ;
- les besoins en matières ou matériaux liés aux infrastructures réseaux (câbles, postes de raccordement pour les EnR, aux réseaux routier, tubes et sous stations des réseaux de chaleur, etc.), aux batteries stationnaires⁶ ou aux infrastructures de recharge des véhicules électriques n'ont pas été évalués ;
- les matières nécessaires pour la maintenance (réparation d'équipements...) ne sont pas comptabilisées ;
- la part des besoins matières liés à l'approvisionnement, la préparation du combustible, le traitement et l'enfouissement des déchets nécessaires dans la filière nucléaire, n'a pas pu être prise en compte par manque de données ;

³ La consommation du polysilicium dans les panneaux photovoltaïques a diminué du fait de l'affinement de la tranche et de l'amélioration des procédés de découpage. En 20 ans cela représente une division par 5 du besoin en silicium par kWc [3].

⁴ Dans ce cas, le platine, le nickel, l'iridium et le titane pourraient être considérés comme des matières à enjeux.

⁵ Biogaz, méthane de synthèse.

⁶ Dans les 4 scénarios modélisés, le stockage stationnaire pour le mix électrique représente en 2050 un maximum de 12 % des consommations électriques du parc de batteries dans les véhicules électriques.

- les qualités de produits finis sont souvent spécifiques (par exemple, le verre pour le PV n'est pas le même que pour les vitrages de véhicules) et il n'a pas été possible de quantifier les consommations ou productions pour chacun des produits spécifiques ;
- les chiffres de consommation française ou de production mondiale des matières comprennent tous les niveaux de qualité des produits finis alors qu'en réalité, certains usages comme le silicium des panneaux solaires, le lithium des batteries ou le béton des centrales nucléaires par exemple sont des produits spécifiques.

4. Quelle consommation unitaire des technologies ? Les filières de la transition utilisent les matériaux différemment

L'utilisation de toutes les énergies (fossiles, fissiles et renouvelables) nécessite des matériaux et des métaux soit pour construire les infrastructures (puits de pétrole, pipelines, réseaux, tankers, mâts d'éoliennes, socles des modules photovoltaïques en centrale...), soit pour les équipements (numérique, batteries, aimants permanents, chaudière...), soit pour les combustibles (notamment mines d'uranium, infrastructures d'enrichissement et d'enfouissement...), sans compter le béton et l'eau. Les académies des sciences et des technologies détaillent les éléments nécessaires à la transition énergétique [4].

Les besoins en matières ou matériaux dans la transition énergétique méritent d'être précisément évalués pour les technologies susceptibles de connaître une croissance importante dans les quatre scénarios : soit pour l'éolien terrestre, l'éolien posé en mer, l'éolien flottant, le PV sur bâti, le PV au sol, le nouveau nucléaire (EPR2) et les véhicules particuliers et utilitaires.

Pour les énergies renouvelables (EnR) électriques et la mobilité, les principaux métaux utilisés sont le fer, le cuivre, l'aluminium, le nickel, le lithium, le cobalt, le plomb, le manganèse, le zinc, le titane, les platinoïdes, les métaux des terres rares (néodyme (Nd), dysprosium (Dy) ou praséodyme (Pr) principalement pour l'éolien en mer), le molybdène, l'indium et l'argent, auxquels il faut ajouter le graphite. En ce qui concerne les matériaux, le béton et le verre sont les plus massivement utilisés dans le déploiement de ces filières.

Pour les technologies associées, les besoins ont été évalués à partir des intensités matières calculées dans le cadre du projet SURFER. Il visait à fournir des éléments de réponse sur la faisabilité de la transition énergétique française au regard des besoins en matières minérales, en matières énergétiques, en eau et en sols. À cette fin, le travail a porté sur la caractérisation des « intensités matières » de certaines technologies du système énergétique (principalement électrique), c'est-à-dire la quantité de matière mobilisée pour une performance donnée. Ces inten-

sités matières (IM) permettent d'estimer les flux et stocks de matières mobilisées selon différents scénarios, mais aussi d'analyser les risques d'approvisionnement associés. Une recherche bibliographique a été effectuée pour identifier des données originales de type « composition matière » pour les technologies de la transition énergétique mais également pour des filières énergétiques conventionnelles (gaz, pétrole, charbon, nucléaire). Ce rapport est disponible dans la Librairie ADEME [2]. Ces IM qui sont détaillées pour plusieurs sous-technologies sont ensuite moyennées pour obtenir une valeur par matériaux et par filière avec un souci de représentativité des installations en France, dans la mesure du possible. Les choix et les valeurs obtenues sont détaillés dans une note qui sera publiée en 2022 [5]. Elles sont ensuite appliquées sur les chroniques de déploiement des différentes filières énergétiques dans les quatre scénarios de l'ADEME (cf. feuilletton *Mix électrique*).

Ces IM pour les filières électriques sont complétées par les besoins en matière des véhicules particuliers et utilitaires légers, toutes motorisations confondues, à partir d'hypothèses de composition proposées par l'ADEME et s'appuyant sur des travaux antérieurs et sur le travail de dimensionnement des parcs de véhicules, leur structuration en taille, en masse et les capacités de stockage d'énergie pour les véhicules électriques et hybrides rechargeables (cf. [1] chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*).

Les 14 matières et métaux considérés dans le présent chapitre sont le béton, l'acier, le cuivre, l'aluminium, les terres rares, le silicium, l'argent, le verre, le titane, le lithium, le graphite, le nickel, le cobalt et l'uranium. Ce chapitre présente les principales hypothèses d'intensité matière utilisées pour la sélection des technologies considérées. Dans les travaux de scénarios prospectifs, il n'y a pas de précisions sur le type de fondation ou parfois sur la technologie de la filière (renouvelable ou nucléaire) qui seront privilégiés. Il est donc nécessaire d'estimer des moyennes de besoins directs en matières par filière de production.

4.1. L'éolien en mer

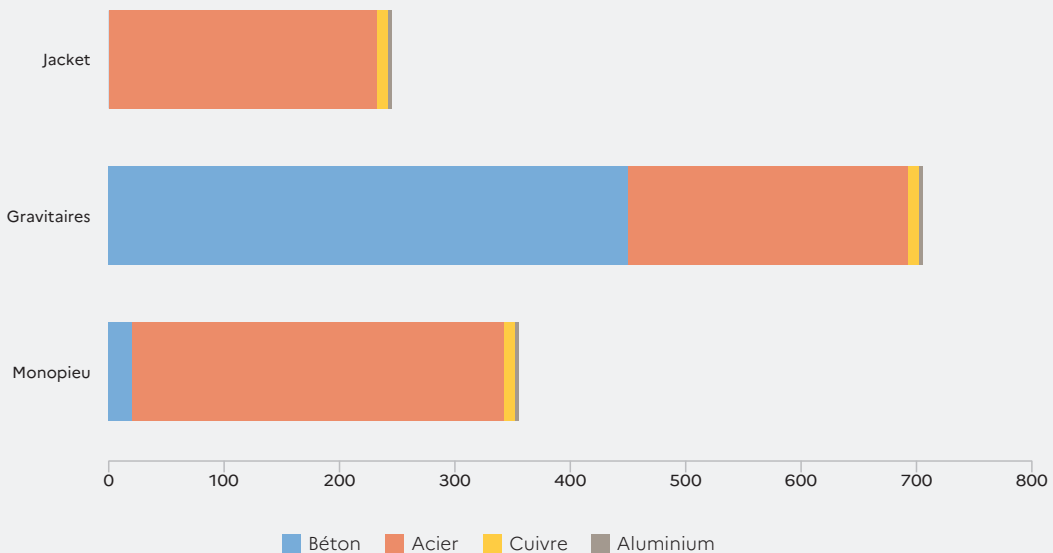
Les données d'intensités matières de l'étude SURFER pour l'éolien en mer donnent les résultats suivants (*Graphique 3*).

Les besoins matières présentés dans le graphique ne tiennent pas compte des gravats nécessaires pour certaines fondations en complément du béton. Les besoins varient du simple au triple en fonction des fondations mises en œuvre. Les fondations gravitaires sont déjà très peu répandues dans le monde et leur utilisation tend à diminuer. Par conséquent, nous proposons pour représenter la filière éolienne en mer et estimer les besoins matières de cette filière, de prendre la moyenne entre les fondations jacket et monopieu.

Les valeurs moyennes de besoins matières présentées dans le *Graphique 4* seront utilisées pour estimer les besoins matières de l'éolien en mer posé dans les scénarios de déploiements. Les besoins en terres rares (néodyme, praséodyme et dysprosium) sont estimés à 0,2 t/MW.

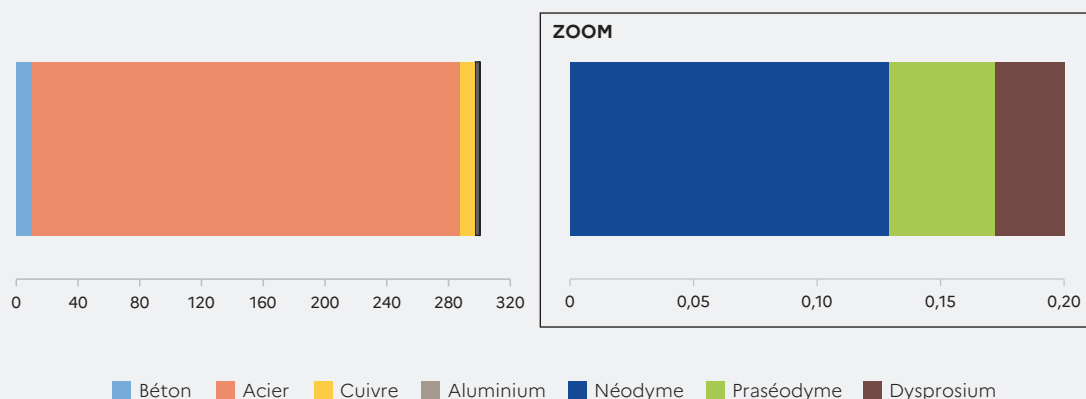
Pour les besoins matières de la filière éolien en mer flottant, les besoins matières des flotteurs ont été estimés en dehors du projet SURFER. À dire d'expert, les flotteurs acier devraient représenter 75 % du déploiement par rapport aux flotteurs béton. Le *Graphique 5* représente les besoins des éoliennes en mer flottantes en pondérant avec les deux types de flotteurs.

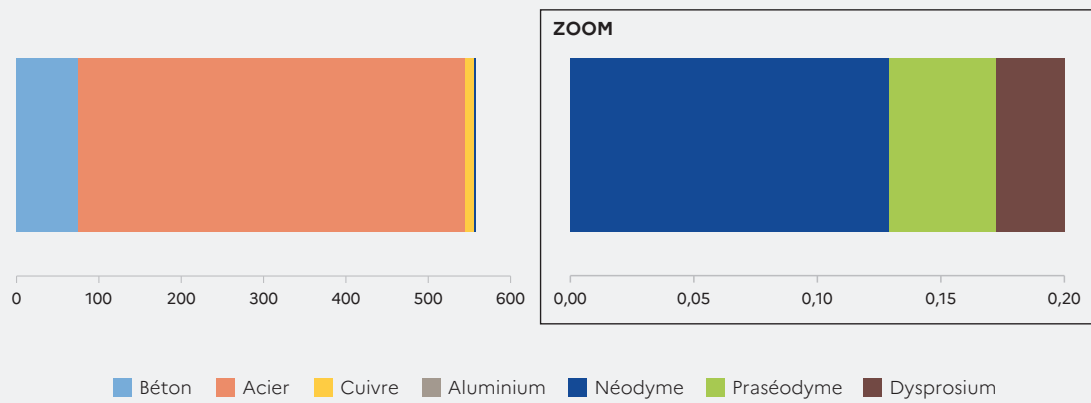
Graphique 3 Besoins matières des éoliennes en mer selon leur fondation en tonnes/MW



N.B. : cette présentation et les suivantes selon les technologies considérées ne comportent pas toutes les 14 matières mentionnées précédemment. Par exemple le silicium, l'uranium ou le verre ne sont pas dans les besoins directs des filières éoliennes.

Graphique 4 Besoins matières moyens des éoliennes en mer posées en tonnes/MW (hors gravats)

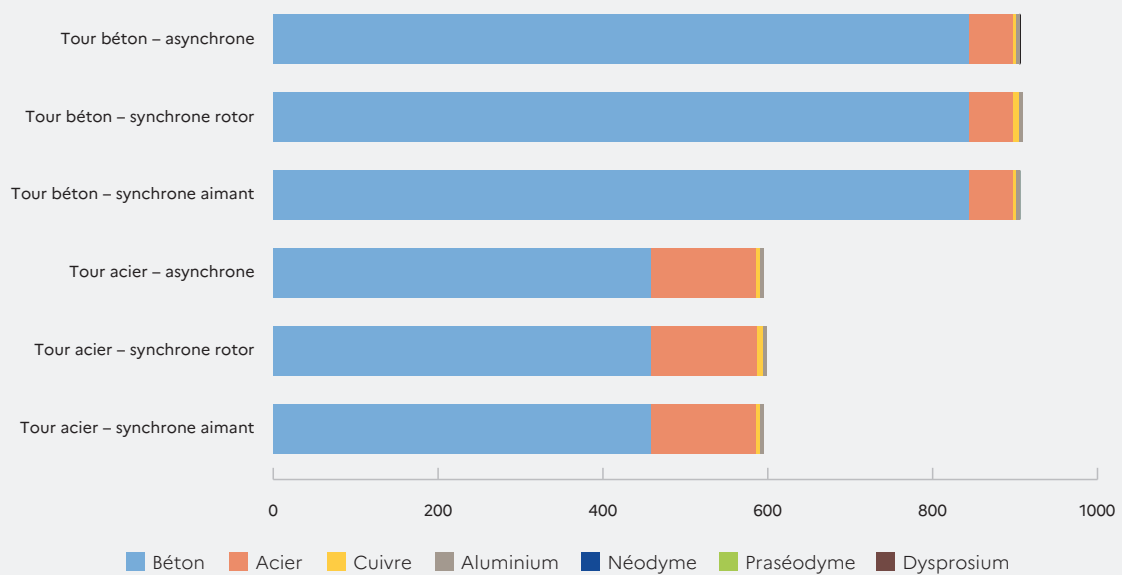


Graphique 5 Besoins matières moyens des éoliennes en mer flottantes (tonnes/MW)

Les deux graphiques précédents peuvent laisser penser que les éoliennes flottantes ont des besoins en matières nettement supérieurs aux éoliennes en mer posées, or ce n'est pas le cas car les gravats ne sont pas comptabilisés pour ces dernières.

4.2. L'éolien terrestre

Les données d'intensités matières de l'étude SURFER pour l'éolien terrestre donnent les résultats suivants (*Graphique 6*).

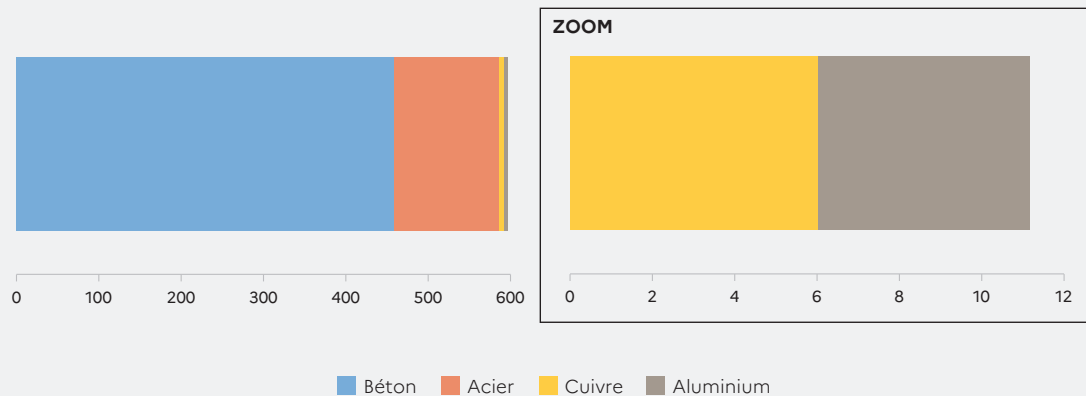
Graphique 6 Besoins matières des éoliennes terrestres selon les technologies et le modèle de tour en tonnes/MW

Les variations sont faibles entre technologies mais la composition de la tour fait varier de manière importante (d'un facteur 1,3) l'intensité matière.

Les éoliennes avec une tour en béton sont rares et ne sont plus installées actuellement. Nous proposons donc de sélectionner uniquement les tours en acier pour modéliser les besoins matières de la filière.

Les éoliennes à aimant permanent représentent seulement 6 % des éoliennes terrestres installées en France et tendent à disparaître [6]. Ainsi, pour estimer les besoins matières de la filière éolienne terrestre en France, nous proposons de faire la moyenne entre les besoins matières des éoliennes à rotors synchrones et asynchrones qui sont très proches.

Graphique 7 Besoins matières moyens de la filière éolienne terrestre en tonnes/MW



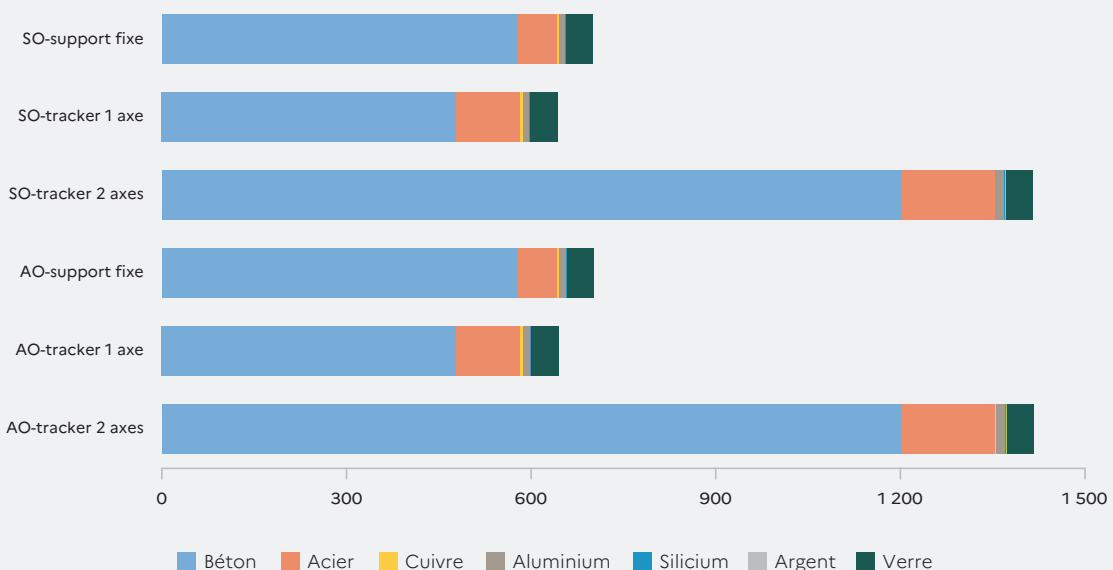
4.3. Photovoltaïque

Les données d'intensités matières du livrable SURFER pour le photovoltaïque en centrale au sol fournissent trois technologies de support et deux possibilités de fondations. En effet, il en existe deux types qui ont des consommations en béton très différentes : longrines 1 150 kg/kWc et pieux vissés 5 kg/kWc.

N'ayant pas d'information sur le modèle de fondation le plus répandu, une moyenne des deux besoins en matières a été prise en compte par la suite.

Ceci permet d'obtenir les estimations des besoins en matières du photovoltaïque au sol (**Graphique 8**).

Graphique 8 Besoins matières du photovoltaïque au sol Avec ou Sans Onduleurs (AO et SO respectivement) et selon leur mode de fixation (tonnes/MWc)

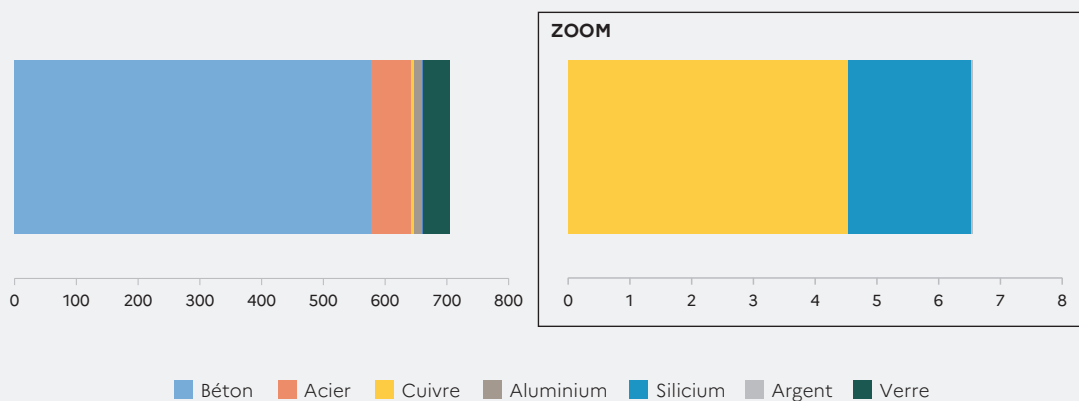


L'hypothèse prise pour l'intensité matière des onduleurs a été de considérer 80 onduleurs de 10 kWc pour un parc de 1 MWc (soit 80 % de la puissance crête installée) afin d'être représentatif des règles de dimensionnement des onduleurs pratiquées en France. Il y a très peu de différences entre les systèmes avec et sans onduleurs car les 80 onduleurs de 10 kWc représentent un besoin matières de 1,6 tonne ce qui est trop faible pour faire une différence entre AO et SO dans le graphique.

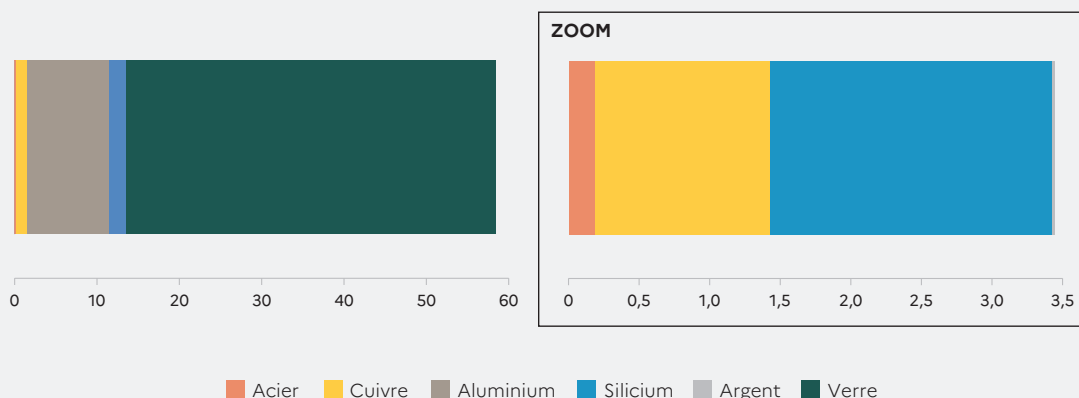
Le **Graphique 8** montre que les variations des besoins matières sont également très importantes selon le choix de la fixation pour les centrales au sol. Pour les scénarios prospectifs, les besoins matières pour les centrales photovoltaïque au sol seront pris avec onduleurs et sur supports fixes (**Graphique 9**).

Les données d'IM pour les fixations des panneaux sur bâtiments ou ombrières ne sont pas disponibles. Nous proposons donc de retirer les besoins en acier et en béton estimés pour les centrales au sol, de celles relatives à une implantation du photovoltaïque sur bâti ou ombrières. Ce choix arbitraire peut conduire à sous-estimer les besoins en béton et acier d'une part et d'autre part à surestimer les besoins en cuivre du fait de besoins en câblage moins important sur toiture qu'au sol. Ainsi, nous pouvons aboutir à des besoins matières pour le photovoltaïque sur bâti ou ombrières tel que décrit en **Graphique 10**. De l'acier est toujours présent du fait de sa nécessité dans les onduleurs.

Graphique 9 Besoins matières moyens de la filière photovoltaïque au sol en tonnes par MWc (l'argent représente 0,02 t/MWc)



Graphique 10 Besoins matières du photovoltaïque sur bâti en toiture et sur ombrières (avec onduleurs) en tonnes/MWc



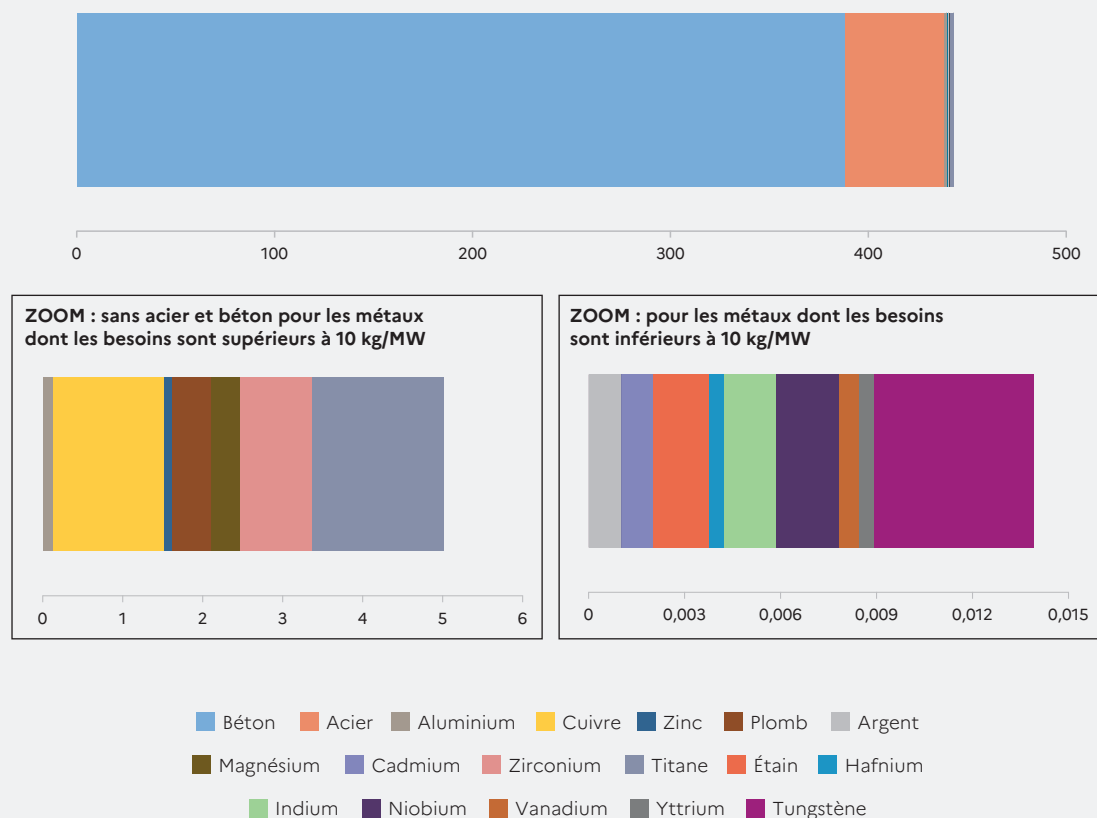
Par ailleurs, les intensités matières du livrable SURFER pour la filière nucléaire concernent uniquement le nucléaire historique, sur la base essentiellement de données recueillies dans la littérature internationale accessible. De plus, il faut aussi noter que le déploiement d'EPR dans le cadre de la transition énergétique, devrait éventuellement se faire sur la base d'EPR2 pour lesquels aucune donnée matières n'est disponible à ce jour. Compte tenu de ces limites fortes, les besoins matières retenus sont présentés dans le **Graphique 11**.

Il faut comparer les données du **Graphique 11** avec précaution aux données pour les autres filières à cause du manque de données dans la littérature, tout particulièrement en ce qui concerne les données relatives à la France⁷ et en lien avec **l'incertitude entourant les données dans les publications**

concernant notamment les périmètres violets et rouges de la Figure 2.

La filière nucléaire utilise un combustible, l'uranium. Il s'agit d'un besoin matière qu'il faut prendre en compte comme pour toutes les filières non renouvelables, car cette matière est consommée. La donnée utilisée sera de 19,2 tonnes/TWh⁸. Dans le cadre de Transition(s) 2050, les besoins matières évalués concernent uniquement les nouvelles centrales nucléaires à construire (EPR2 ; en supposant que les besoins matières de ces centrales sont les mêmes que ceux du nucléaire historique). Les consommations matières liées au prolongement de la durée de vie du parc historique ne sont pas évaluées car il n'y a pas de données disponibles dans la littérature, que ce soit pour la France ou à l'international.

Graphique 11 Besoins matières de la centrale nucléaire en tonnes/MW



N. B. : ces besoins 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.

⁷ Il n'a pas été possible de trouver une analyse du cycle de vie complet du parc nucléaire français réalisée selon la norme ISO 14040 qui seule permet d'assurer que l'ensemble du cycle de vie est bien pris en compte.

⁸ Voir https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/donnees_nucleaire_2016.pdf. En 2015, la France a consommé 8 000 tonnes d'uranium pour une production d'électricité d'origine nucléaire de 415 TWh.

4.5. Véhicules particuliers et utilitaires légers

Les besoins en matières des véhicules pour un scénario prospectif donné ont été déterminés d'une part par la composition en matériaux du véhicule et d'autre part par la composition de la batterie pour les véhicules électriques et hybrides rechargeables. Nous nous limitons aux véhicules particuliers (VP) et utilitaires légers (VUL) qui représentent la majorité des besoins en matériaux (fort volume de vente, renouvellement plus rapide que les matériels lourds comme le ferroviaire ou le fluvial). Lors de ces estimations, la prise en compte d'évolutions technologiques a été réalisée pour la variation de masse des véhicules (allègement plus ou moins marqué pour les scénarios S1 et S2, poursuite ou renforcement de la tendance à l'alourdissement pour les scénarios S3 et S4). De même, ont été considérés les évolutions de la composition matière des automobiles ainsi que celles des densités énergétiques et teneur en matériaux des batteries. Toutefois, les besoins matières ne prennent pas en compte l'ensemble du cycle de

vie des véhicules mais uniquement les besoins directs. Ainsi, les besoins matières concernant l'entretien et les réparations ne sont pas comptabilisés.

Par ailleurs, comme évoqué dans la **section 2**, les estimations portent sur la matière mobilisée et ne considèrent pas la forte recyclabilité et le réemploi d'ores et déjà effectifs des matériaux les plus présents comme les métaux ferreux (dont l'acier), les métaux non ferreux hors et avec faisceau électrique (dont l'aluminium et le cuivre) ou le verre. Pour ces derniers, des filières sont existantes en réponse à la directive européenne 2000/53/CE sur le Véhicule hors d'usage (VHU) qui stipule un taux minimal de réutilisation et de recyclage de 85 % en masse du VHU et même de 95 % en réutilisation et valorisation. Les taux réalisés effectifs de réutilisation et recyclage [7] pour les matériaux cités ci-avant se situent aujourd'hui entre 38 % et 99 % comme présenté dans le **Tableau 1** ci-après (cf. les deux premières colonnes) :

Tableau 1 Répartition par type de traitement de quelques matériaux d'un VHU

	Réutilisation (%)	Recyclage (%)	Valorisation énergétique (%)	Stockage/décharge (%)
Métaux ferreux	8,9	91,1	-	0,02
Métaux non ferreux	8,9	91,1	-	0,03
Faisceaux électriques	6,8	74,6	7,1	11,5
Verre	6,8	31,8	27	34,3

Il doit être également noté que les matériaux à forte valeur/criticité font également l'objet d'une attention particulière : c'est le cas pour les platinoïdes (platine, palladium, rhodium) des systèmes de post-traitement catalytiques des émissions à l'échappement des automobiles pour lesquels la réutilisation et le recyclage (respectivement 20 % et 80 %) sont désormais quasi-totaux. La refonte de la directive Batteries en discussion dans les instances européennes [8] prévoit des ambitions élevées de recyclage et de récupération des matériaux des batteries Li-ion avec, dans un premier temps au 01/01/2027, une obligation d'incorporation minimum de matière recyclée pour le Co, Li, Ni respectivement de 12 %, 4 %, 4 %. Puis à compter du 01/01/2030, ce taux d'incorporation passerait à 20 %, 10 % et 12 % au 01/01/2035. Dans cette optique

et compte tenu des enjeux, de nombreux projets technologiques (prototypes) et des validations technico-économiques (démonstrateurs) sont lancés par plusieurs acteurs en matière de réutilisation et de recyclage. Nous pouvons citer la création d'un consortium ouvert porté par Renault avec Veolia et Solvay ; le projet « RelieVe » porté par Eramet en partenariat avec Suez et BASF ; le projet « Recyvat » porté par Orano en partenariat avec Paprec, MTB Manufacturing, la Saft et le CEA, et plus généralement la démarche initiée par le Conseil National de l'Industrie dans le cadre du Comité Stratégique de Filières Mines et Métallurgie en vue de l'élaboration d'une filière intégrée de recyclage des batteries lithium [9].

Dans le cadre de l'analyse des consommations énergétiques pour l'usage des véhicules abordées dans le chapitre 2.1.3. *Mobilité des voyageurs et transport de marchandises* du rapport de novembre 2021 [1] les diffusions des différentes technologies et des hypothèses (non détaillées dans le présent feuillet) ont été prises pour les véhicules en différentes tailles et masses.

Pour la composition du véhicule, le cumul des immatriculations des véhicules particuliers et utilitaires légers a été réalisé pour chaque scénario entre 2020 et 2050. La masse du véhicule moyen de chaque scénario a été estimée en prenant en considération la ventilation des ventes par gabarit (trois classes de tailles : *small, medium, large*) et l'appartenance à une des quatre familles technologiques suivantes : véhicules thermiques (VTh) dont hybrides non rechargeables (VHnR), véhicules hybrides rechargeables (VHR), véhicules électriques (VE) et véhicules à hydrogène (VH₂) sur la période 2020-2050. Des hypothèses spécifiques de masse hors batteries de stockage pour les VE et VHR et hors système Pile à Combustible pour les VH₂ pour chacune des catégories (3 tailles x 4 technologies) et leurs évolutions envisagées dans le temps ont été retenues. Par ailleurs, pour les véhicules utilitaires légers, les données précédentes ont été réutilisées de manière simplifiée avec un facteur 1,3 pour majorer les masses et représenter l'écart observé avec les véhicules particuliers sur la dernière décennie (analyse ADEME sur les données de ventes).

En pondérant avec les ventes par technologie et gabarit sur toute la période, nous obtenons un besoin matières moyen annuel entre 2020 et 2050 pour chaque scénario.

ACIER, ALUMINIUM ET VERRE POUR LES VP ET VUL

À partir de ces données et de la composition moyenne des véhicules en matériaux selon un ratio retenu par constituant au regard des travaux sur les analyses de cycle de vie des véhicules électriques, thermiques [10] et hydrogène [11] que l'ADEME a pu suivre récemment, ainsi que d'éléments prospectifs envisagés par la Plateforme automobile (PFA) [12] nous pouvons estimer les besoins en matières pour l'acier, l'aluminium et le verre de la totalité des véhicules particuliers et utilitaires légers vendus entre 2020 et 2050 pour chaque scénario. Ces besoins pourront alors être comparés à ceux nécessaires à la production actuelle de véhicules comme cela est présentée au 6.2.

CUIVRE POUR LES VP ET VUL

L'estimation de la composition en cuivre du véhicule moyen (hors batterie) est estimée pour sa part, selon une donnée (kg Cu hors batteries) dépendante de la taille des véhicules et de leurs technologies de traction, que nous conservons sur la période pour tenir compte des deux évolutions antagonistes suivantes : progrès sur matériaux et optimisation des quantités employées *versus* augmentation des composants électriques/électroniques et de la puissance des machines électriques installées.

Pour mémoire, on notera que la première génération de Nissan Leaf disposait par exemple de motorisation de 80 kW pour des capacités de stockage batteries de 24 puis 30 kWh, tandis que la génération actuelle se voit proposer avec les spécifications suivantes 110 kW/40 kWh et 160 kW/62 kWh.

Les valeurs retenues ont été fixées à partir des éléments proposés dans le modèle GREET2 d'Argonne National Lab pour le cuivre hors batteries pour les véhicules conventionnels et les SUV hors Pick-Up, ainsi qu'une extrapolation pour le cas des véhicules de petite taille [13] et des écarts de contenu en cuivre selon les organes et type de chaîne de traction (VTh/VHnR/VHR/VE) présentés par la Copper Alliance [14]. Les quantités de cuivre hors batteries pour les véhicules particuliers et utilitaires sur la période sont alors obtenus avec les volumes de VP et VUL neufs considérés dans les différents scénarios et sont ramenés en besoins annuels comme pour l'aluminium, l'acier et le verre.

MATÉRIAUX POUR LES BATTERIES : LITHIUM, COBALT, NICKEL, GRAPHITE, ALUMINIUM ET CUIVRE

Dans un deuxième temps, la composition des batteries a été estimée pour les véhicules électriques et hybrides rechargeables. Les véhicules à piles à combustibles ne sont pas pris en compte dans cet exercice, au regard de leur faible diffusion parmi les véhicules légers et des tailles limitées des batteries tampons pour ces véhicules.

Le besoin matière pour les batteries peut être évalué à partir des capacités énergétiques installées dans les véhicules prévus dans les différents scénarios en utilisant des facteurs kg/kWh pour les matériaux des batteries selon la référence Transport et Environnement 2021 [15] en prenant les valeurs en 2035 (mi-chemin entre 2020 et 2050) pour la composition des cellules, complétés dans le cas de l'aluminium et du

cuivre par une composante liée respectivement au packaging des batteries et du besoin en cuivre pour les câbles/connectiques [16].

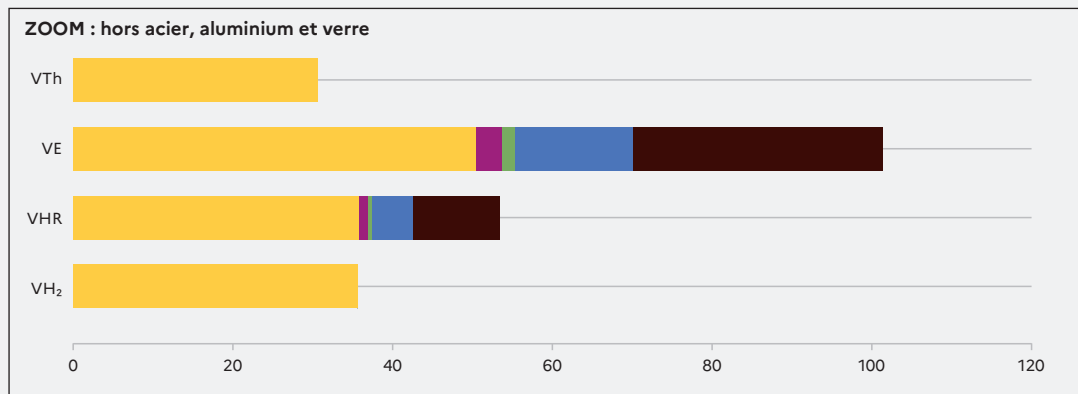
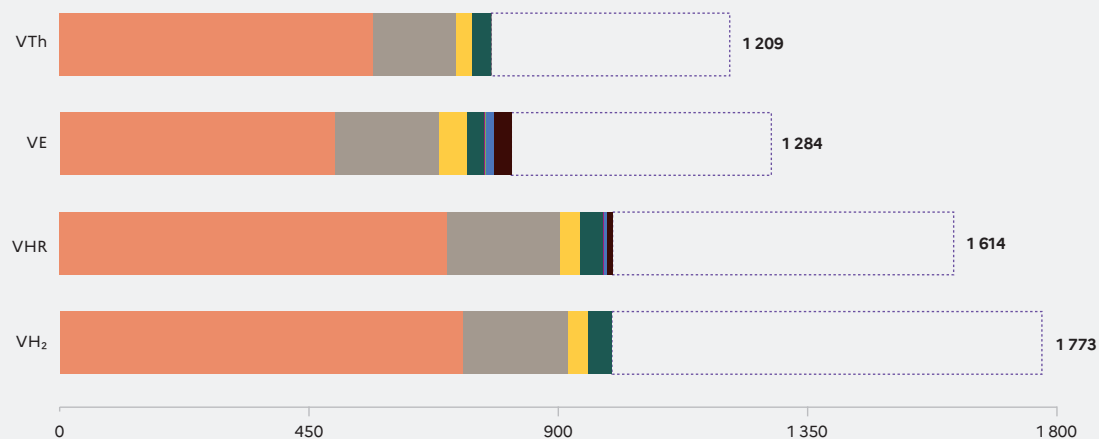
À partir de ces données, il est possible d'obtenir les demandes moyennes pour les matériaux lithium, cobalt, nickel, graphite, aluminium et cuivre pour les batteries des véhicules particuliers électriques et hybrides rechargeables ainsi que pour les batteries des véhicules utilitaires (hypothèse de composition et capacité énergétique installées similaires mais volume de ventes et répartition technologique VHR/VE spécifiques).

L'addition des besoins matières pour le véhicule d'une part et la batterie d'autre part, permet d'obtenir pour chaque scénario le besoin matière annuel moyen pour l'ensemble des véhicules légers.

Le **Graphique 12** ci-après, illustre dans le cas d'un véhicule moyen pour la période 2020-2050 et pour les différents scénarios, la demande matière unitaire en kg/véhicule pour les matériaux considérés dans ce chapitre. Les véhicules particuliers moyens consi-

dérés pour cette représentation possèdent les caractéristiques suivantes : VTh : 1 209 kg ; VE : 1 284 kg ; VHR : 1 614 kg et VH₂ : 1 773 kg et renferment bien évidemment d'autres matériaux non détaillés dans le graphique comme le caoutchouc, les différents polymères plastiques ou composites et les autres métaux non ferreux (hors cuivre, nickel, aluminium, lithium, cobalt). Ces composants regroupés dans la catégorie « Autres » ne représentent pas une part constante entre les quatre technologies car ces technologies ne se diffusent pas uniformément dans les différentes tailles de véhicules. Pour le véhicule H₂, ce phénomène est amplifié par la présence pour cette technologie d'un réservoir de stockage haute pression pesant à lui seul une centaine de kilogrammes et constitué très majoritairement de plastique, fibre de carbone et fibre de verre. Bien évidemment pour les quantifications des besoins matières moyens annuels des différents scénarios, dont les résultats sont présentés dans la **section 4**, les données d'entrées (masse moyenne, mix technologique des véhicules neufs et volume de vente) spécifiques à chacun des scénarios sont utilisées.

Graphique 12 Besoins matières selon les technologies de traction en kg/véhicule pour un véhicule particulier moyen



Acier Aluminium Cuivre Verre Lithium Cobalt
Nickel Graphite Autres matériaux (polymères, non ferreux...)

VTh : véhicules thermiques dont hybrides non rechargeables ; VE : véhicules électriques ; VHR : véhicules hybrides rechargeables ; VH₂ : véhicules à hydrogène.

Nous ne présentons pas de quantification sur les besoins en terres rares (REEs) pour les véhicules, bien que des matériaux de cette famille – notamment Nd, Dy et Pr – puissent être présents dans les véhicules pour les moteurs électriques en cas d'utilisation d'aimants permanents pour des choix de compacité et d'efficacité de ces composants.

En effet, les éléments Nd, au travers du NdFeB (alliage de néodyme, fer et bore), Pr et Dy se retrouvent dans les aimants permanents avec des proportions aux alentours de 30 % pour l'ensemble Nd et Pr avec ratio de 4:1 entre ces 2 composés et 7,5 % pour le Dy. Soit un total de 0,56 kg de terres rares (REEs) pour un aimant permanent de 1,5 kg d'un moteur synchrone à aimant permanent (PSM) de véhicule électrique ; pour une technologie moteur synchrone différente combinant l'effet de reluctance et aimant permanent, la quantité de REEs va s'avérer plus faible (0,37 kg) en raison de la moindre quantité d'aimant permanent (1 kg de NdFeB dans cet exemple) [17].

Des technologies alternatives sans utilisation de terres rares sont d'ores et déjà disponibles et les acteurs industriels sont déjà sensibilisés sur les enjeux économiques liés au recours à ces matériaux (contexte géopolitique, forte volatilité).

À titre d'exemple, les véhicules largement diffusés comme la Renault Zoe et Tesla Model S, disposent de motorisation électrique sans recours à des aimants

permanents, respectivement avec une motorisation synchrone à excitation indépendante pour la Zoe et une motorisation asynchrone à rotor bobiné induit pour les Model S phase 1 et 2. De même, le constructeur BMW présente sa nouvelle génération de solution de traction électrique (5th BMW e-drive) en mettant en avant la suppression du besoin en terres rares [18], c'est aussi le choix d'Audi et Mercedes avec des moteurs à induction pour leurs SUV électriques « E-tron » et « EQC » [19].

Et pour les marques et modèles utilisant des motorisations à aimants permanents, la recherche de solution à moindre teneur en terres rares d'une génération à l'autre est avérée : gain de 40 % sur le Dy pour la Nissan Leaf et de 80 % pour la Chevrolet Volt [20]. Les travaux de l'Öko Institute [21] : avec des possibilités de très forts gains sur ces matériaux selon la combinaison d'hypothèses (changement de technologies moteurs, utilisation de matériaux plus efficace, baisse de la quantité d'aimant) avec des abattements par rapport au besoin 2020 de 12 à 73 % sur Nd et Pr et de 33 à 80 % pour le Dy.

Aussi, même si la hausse de la demande en matériaux pour les VE et VHR et leurs moteurs électriques est avérée quel que soit le scénario considéré de l'exercice prospectif, il n'est pas possible selon nous de se prononcer avec certitude sur l'usage des terres rares et nous estimons que le besoin devrait pouvoir être contenu avec un marché en mesure de s'adapter.

5. Quels besoins à l'horizon 2050 ? Les véhicules utilisent plus de métaux stratégiques⁹ que les EnR dans tous les scénarios

Après prise en compte des chroniques de déploiement des différentes technologies, les besoins matières des scénarios se révèlent croissants entre S1 et S4. Ils sont exprimés dans les prochains graphiques en tonnes sous la forme de besoins moyens annuels entre 2020 et 2050 pour les technologies étudiées. Compte tenu des ordres de grandeurs très disparates et pour faciliter la lecture des graphiques, nous distinguerons les matériaux et métaux utilisés :

- en grande quantité (plus de 50 kt/an) soit le béton, le cuivre, l'aluminium et le verre que nous appellerons « grands matériaux et métaux » – « grands » au sens de « à forte demande » ;
- dans de petites quantités (moins de 50 kt/an) que nous appellerons « petits matériaux et métaux », « petits » au sens de « à moindre demande ».

Dans ce découpage, les « petits matériaux et métaux » sont des métaux considérés comme critiques en France selon Mineral Info [22]. En clair, ils revêtent un caractère stratégique pour l'économie et sont sujets à une grande volatilité des prix, voire à des risques d'approvisionnement susceptibles d'altérer significativement la compétitivité des industries qui en dépendent. Mais la disponibilité physique des ressources n'est pas en cause.

L'estimation des besoins matières des scénarios prend en compte la durée de vie des équipements (EnR et véhicules), et par conséquent le « repowering » nécessaire pour les technologies éoliennes et photovoltaïques durant la période 2020-2050 en tenant compte des parcs installés en 2020. Toutefois, pour les EnR, comme pour les véhicules, il s'agit des besoins bruts sans prendre en compte le fait qu'une partie de ces besoins pourrait provenir du recyclage.

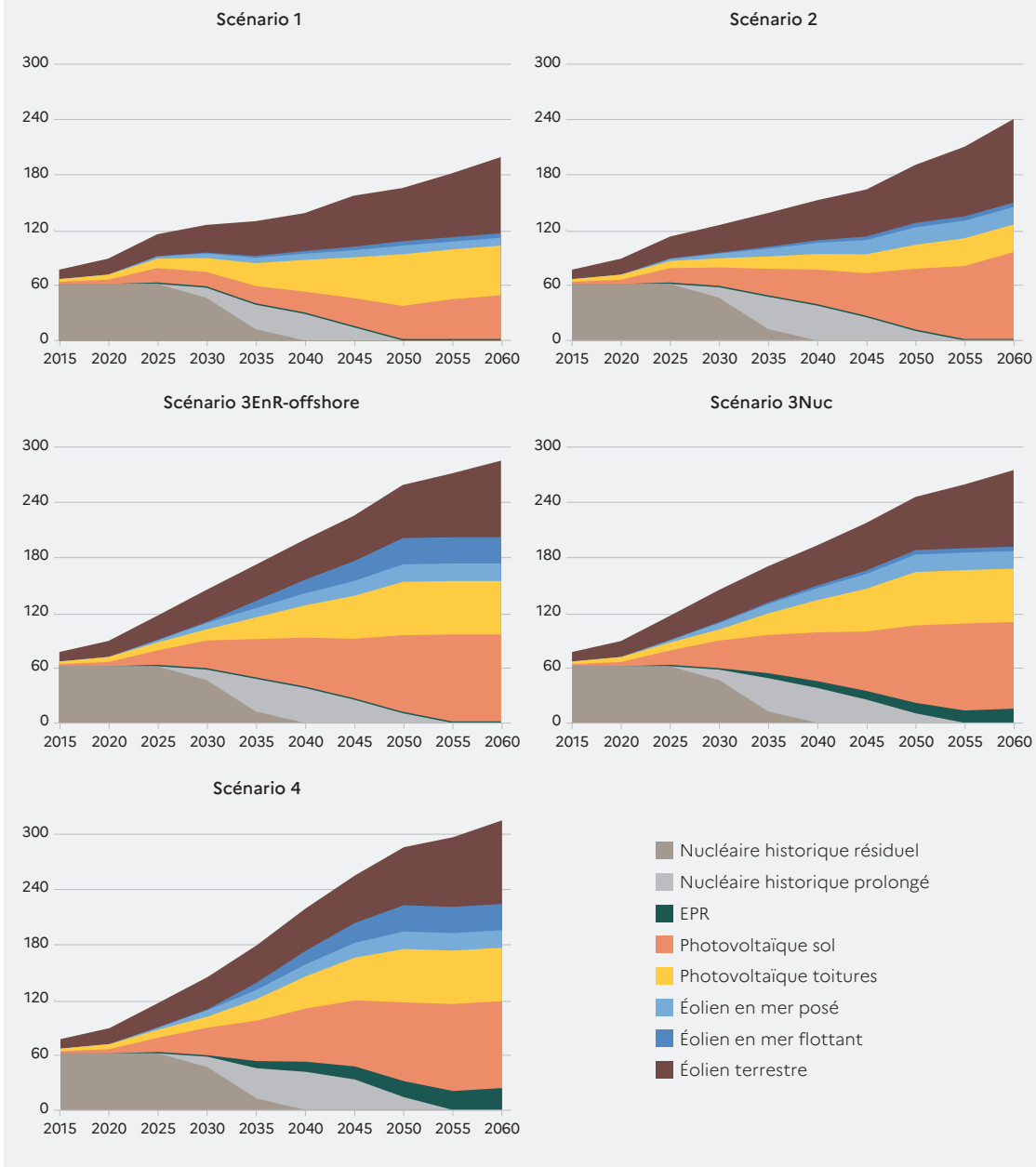
⁹ La définition de métaux stratégiques est proposée en annexe.

5.1. Rappel des chroniques de déploiement des technologies étudiées

Les chroniques de déploiements prises en compte pour l'estimation des besoins en matières sont issues des travaux du projet Transition(s) 2050. Le déploiement des filières éolienne, photovoltaïque et nu-

cléaire dans les différents scénarios est décrit dans la publication dédiée au mix électrique. Les chroniques de déploiements sur la trajectoire 2015-2050 sont rappelées dans le graphique suivant.

Graphique 13 Chroniques de déploiements des filières éolienne, photovoltaïque, et nucléaire pour les 5 scénarios de Transition(s) 2050 (parc installée, en GW)

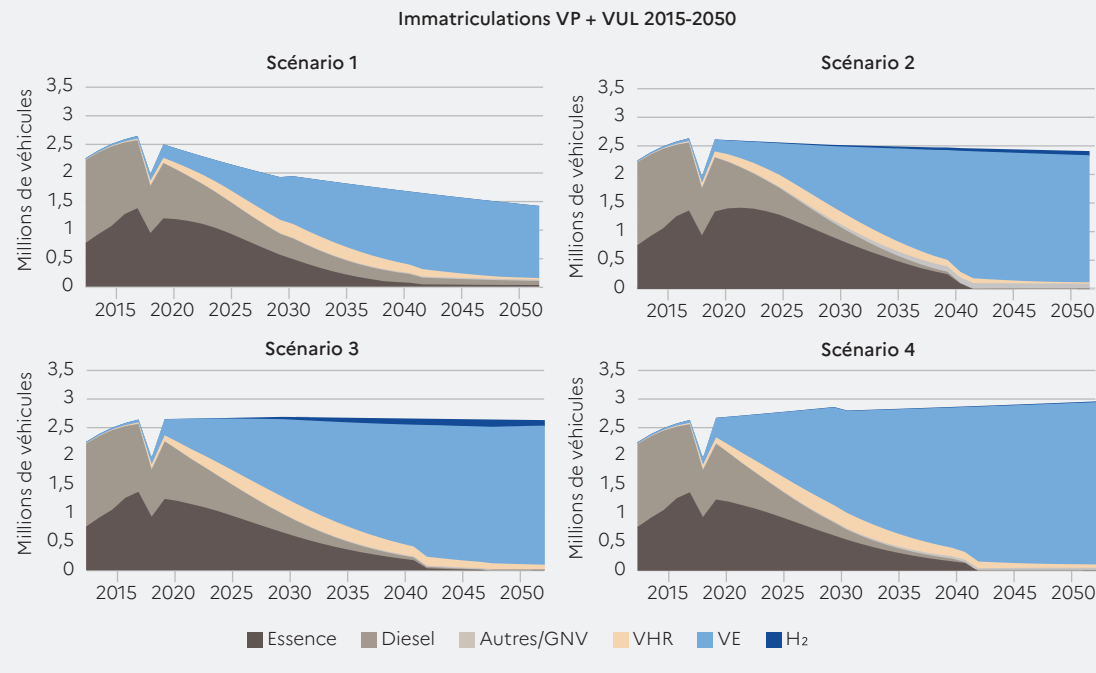


Les évolutions des modes de transports pour les particuliers et les véhicules utilitaires légers dans les différents scénarios sont décrites dans le rapport Transition(s) 2050 [1] au chapitre 2.1.3. *Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*. La pénétration des technologies alternatives, en particulier la traction électrique au travers des véhicules électriques ou hybrides rechargeables et le recours à des vecteurs gazeux (gaz naturel et hydrogène) est représentée dans le *Graphique 14* et le *Graphique 15*

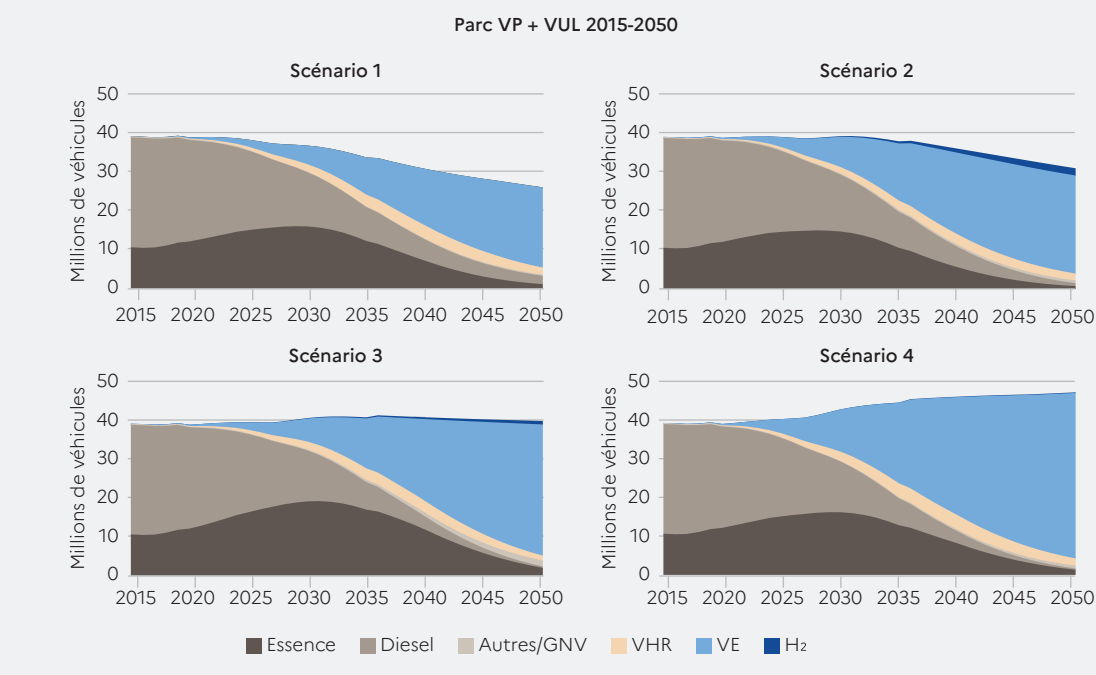
qui illustrent respectivement les volumes de ventes de véhicules neufs par technologie et la transformation du parc pour les véhicules légers (voitures particulières et véhicules utilitaires légers).

Pour l'estimation des besoins en matières la durée de vie spécifique à chaque filière est prise en compte. Ces durées de vie sont décrites dans le feuillet *Mix électrique*. Ainsi le renouvellement est comptabilisé dans les estimations des besoins en matières.

Graphique 14 Déploiement des vecteurs énergétiques alternatifs dans les ventes de véhicules particuliers et utilitaires légers sur 2015-2050 selon les scénarios



Graphique 15 Transformation du parc de véhicules particuliers et utilitaires légers durant la période 2015-2050 selon les scénarios



5.2. Besoins pour les grands matériaux et métaux

Les 5 graphiques du **Graphique 16** montrent les besoins matières moyens annuels des filières énergétiques et des véhicules des 5 différents scénarios entre 2020 et 2050 pour les grands matériaux et métaux.

Comme le montre le **Graphique 16**, ce sont les véhicules, le PV au sol et l'éolien terrestre qui représentent la plus grande part de consommation de ces grands matériaux et métaux en particulier le béton, l'acier et l'aluminium.

Graphique 16 Besoins matières moyens annuels en tonnes/an entre 2020 et 2050 d'une partie des systèmes énergétiques et des véhicules particuliers et VUL des scénarios prospectifs



* Pour le nucléaire, les besoins « grands 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](#).

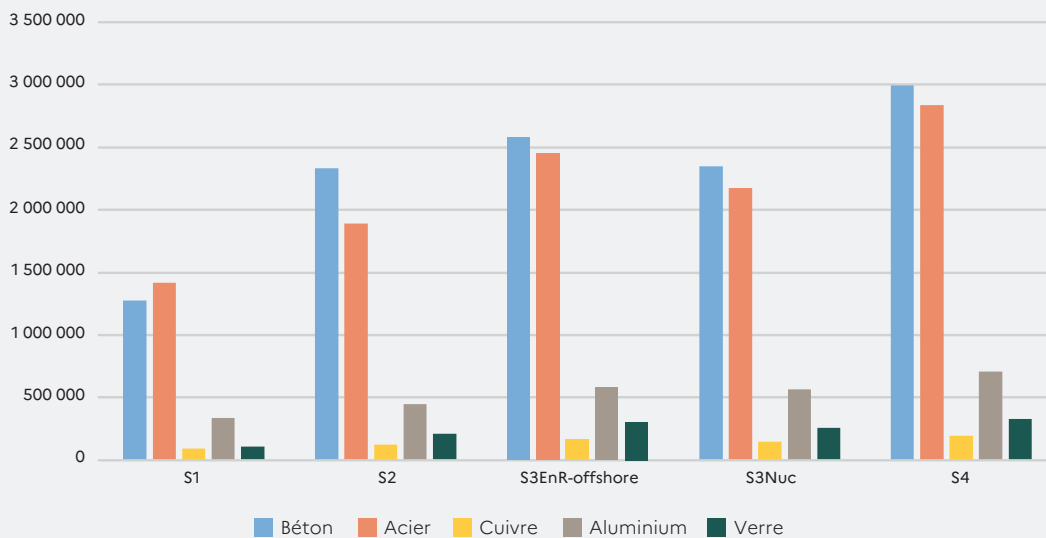
Le **Graphique 17** montre que la consommation de béton évolue différemment suivant les scénarios et les filières. Ceci peut s'expliquer du fait que pour le PV au sol, la consommation croît de S1 à S4 dans la mesure où le parc installé augmente de S1 à S4. Pour l'éolien terrestre en revanche, le déploiement est presque identique entre tous les scénarios, les besoins matières associés sont donc quasiment égaux.

Pour l'acier, l'aluminium et le cuivre dont l'utilisation dans cette analyse est essentiellement le fait des

véhicules (autour de 60 % pour l'acier, de 90 % pour l'aluminium et de 75 % pour le cuivre), les quantités annuelles nécessaires croissent de S1 à S4 dans la logique des écarts de volume des ventes de véhicules neufs et des évolutions de leurs caractéristiques (gabarit et technologie de traction).

Pour le verre dont l'utilisation est principalement liée au développement du photovoltaïque ($\approx 70\%$ des usages étudiés), la consommation croît de S1 à S4 dans la mesure où le parc installé augmente de S1 à S4.

Graphique 17 Besoins annuels en grands matériaux et métaux en tonnes pour les différents scénarios



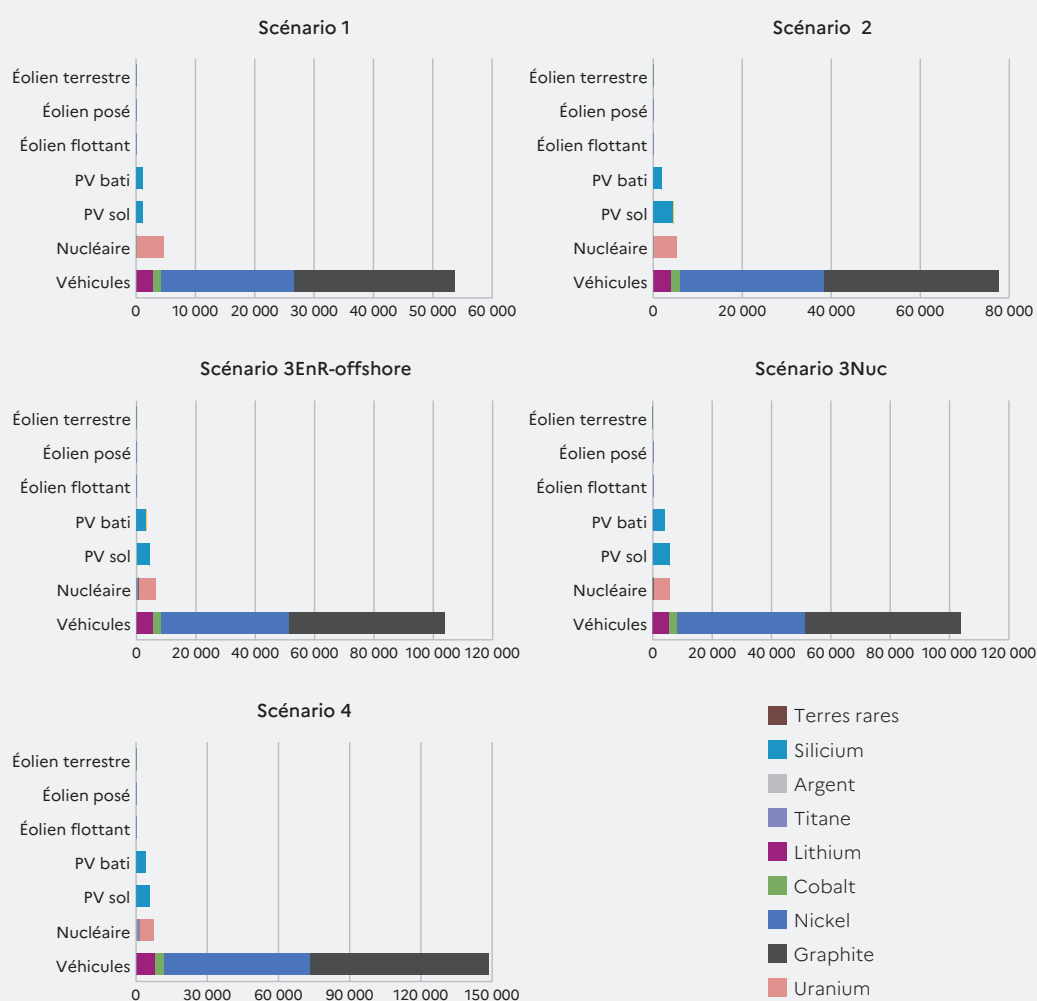
5.3. Besoins pour les petits matériaux et métaux

Les 5 graphiques du **Graphique 18** montrent les besoins matières moyens annuels des filières énergétiques et des véhicules des 5 différents scénarios entre 2020 et 2050 pour les petits matériaux et métaux.

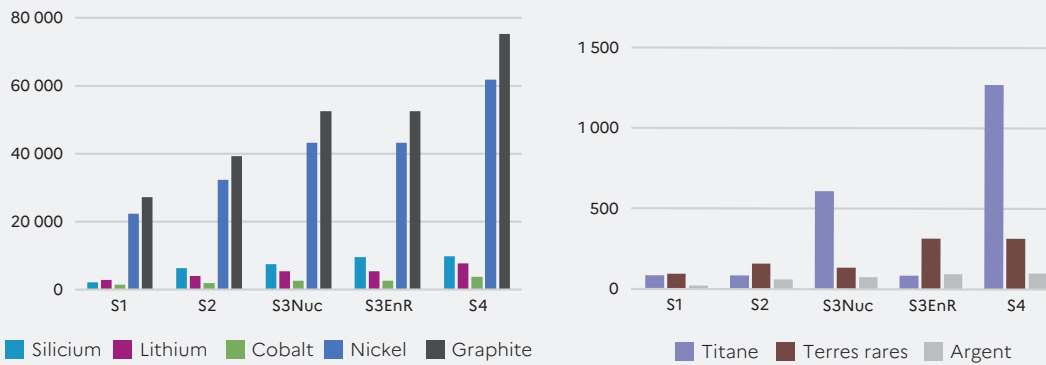
On voit très bien que pour la plupart des petits matériaux et métaux, c'est leur utilisation dans les véhicules qui domine les besoins annuels. Le nickel et le graphite représentent les besoins les plus

importants et sont uniquement utilisés pour les véhicules dans le périmètre étudiés dans ces travaux. Par ailleurs, trois filières (les véhicules, le PV au sol et le PV bâti) concentrent les besoins sur trois métaux à savoir, le silicium, le lithium et le cobalt. Ces trois filières diffèrent de celles identifiées précédemment pour les grands matériaux et métaux.

Graphique 18 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](#).

Graphique 19 Besoins annuels en petits matériaux et métaux en tonnes pour les différents scénarios

Le silicium est exclusivement utilisé pour le PV avec une consommation croissante de S1 à S4 liée à l'augmentation des puissances installées pour satisfaire la demande en énergie elle-même croissante.

Le lithium, le cobalt, le nickel et le graphite sont uniquement utilisés pour les batteries des véhicules électriques et hybrides avec des besoins croissants de S1 à S4 en raison du nombre de véhicules nécessaires dans chaque scénario pour satisfaire la demande de mobilité et de leurs caractéristiques (autonomie électrique visée, capacité de stockage d'énergie).

Pour des raisons méthodologiques, le titane est considéré dans le cadre du présent rapport uniquement pour le nucléaire, les besoins sont donc logiquement les plus importants dans les scénarios qui nécessitent des EPR2 supplémentaires en plus de l'EPR de Flamanville à savoir le S3Nuc (3 paires

d'EPR2 supplémentaires) et S4 (6 paires d'EPR2 supplémentaires) (cf. feuilleton *Mix électrique*).

La dénomination terres rares recouvre en fait 17 métaux dont une partie concerne uniquement les aimants permanents de l'éolien en mer (cf. *section 1* du présent chapitre) à savoir le Dy et le Nd, étant entendu que les besoins pour les applications véhicules n'ont pas été quantifiés comme évoqué en *section 4.5*. Les différences de besoin entre scénario sont donc logiquement liés au développement de l'éolien en mer à savoir le S3EnR et le S4 pour faire face à la demande d'électricité plus forte pour ces deux scénarios.

L'argent est principalement utilisé dans le PV bâti ou au sol et accessoirement dans l'industrie nucléaire. Les besoins sont donc globalement croissants de S1 à S4 avec une demande équivalente entre S2 et S3Nuc liée au développement du nucléaire dans S3Nuc à la place du PV et de l'éolien en mer.

6. Comparaison avec la situation actuelle

6.1. Le béton

Le béton est actuellement principalement consommé dans les secteurs du bâtiment et des travaux publics. La criticité de l'émergence de besoins croissants pour le secteur électrique est donc à analyser au regard :

- de la part que représentent ces nouveaux besoins par rapport à la consommation actuelle : celle-ci est de 131 Mt/an. Les besoins supplémentaires annuels moyens sur la période 2020-2050 représentent donc une part faible rapportée à la consommation actuelle (entre 1 et 2,5 %) ;
- de l'évolution de la consommation dans les secteurs du bâtiment et des travaux public : elle est orientée à la baisse dans tous les scénarios (cf. [1], partie 2. *Évolution du système productif*, chapitre 2.2.2. *Production forestière*).

Ainsi, l'impact des besoins supplémentaires liés aux EnR, variant de 1,3 à 3Mt selon le scénario, est faible dans un contexte de consommation orienté à la baisse, il n'y a donc pas d'enjeu critique sur le béton.

6.2. L'acier et l'aluminium

Les consommations moyennes annuelles d'acier et d'aluminium sur la période 2020-2050 sont donc de :

- Acier : entre 1,4 et 2,8 Mt selon le scénario ;
- Aluminium : entre 0,34 et 0,71 Mt selon le scénario.

Pour ces métaux abondamment utilisés dans l'économie, la criticité est à analyser au regard :

- des quantités actuelles utilisées : plus de 12 Mt de demande d'acier en 2014 et 1,1 Mt pour l'aluminium ;
- des changements qui s'opèrent par rapport aux consommations actuelles avec d'une part une substitution de l'acier par de l'aluminium – qui est générale pour tous les scénarios sur les véhicules – et d'autre part l'évolution sur les volumes de ventes et les masses des véhicules (baisse pour S1-S2, hausse pour S3-S4).
- de l'évolution dans les autres secteurs, également orienté à la baisse pour l'acier, et à la hausse pour l'aluminium.

Tableau 2 Évolution de la demande moyenne annuelle de la période 2020-2050 en acier et aluminium pour les véhicules par rapport à la consommation 2015

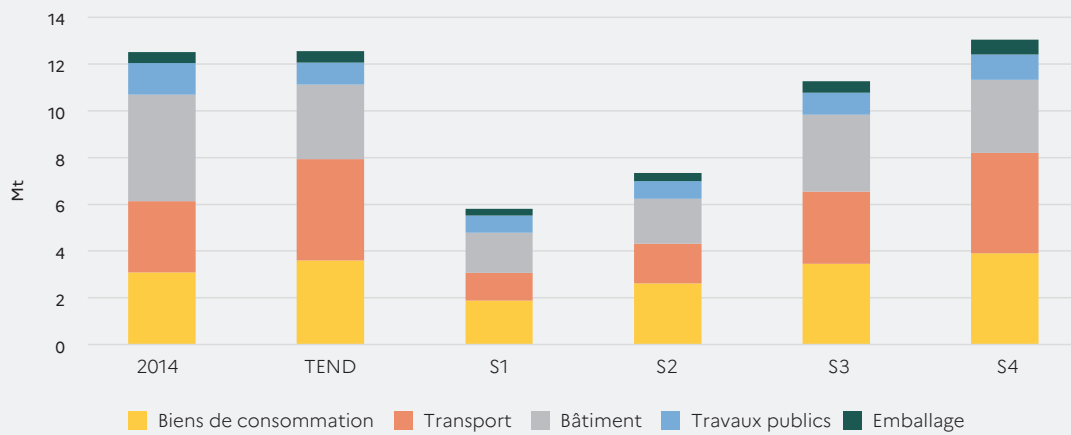
Évolution de la consommation pour les véhicules	S1	S2	S3	S4
Acier	- 50 %	- 36 %	- 20 %	- 3 %
Aluminium	+ 16 %	+ 50 %	+ 91 %	+ 138 %

Pour l'acier, comme le montre le **Graphique 20** issu de [23], il en résulte une consommation totale orientée à la baisse, sauf dans S4 où elle augmente de 4 % en 2050. **Il n'y a donc pas d'enjeu critique pour l'acier.** La demande d'acier dans les quatre scénarios en 2050 s'échelonne entre 6 Mt et 13 Mt/an et inclut les besoins liés à l'industrie automobile. Les besoins supplémentaires liés au développement des EnR (de l'ordre de 0,9 Mt au maximum, dans S4) n'ont pas été inclus dans ce graphique et conduiraient donc à une augmentation de la production par rapport à aujourd'hui uniquement dans S4.

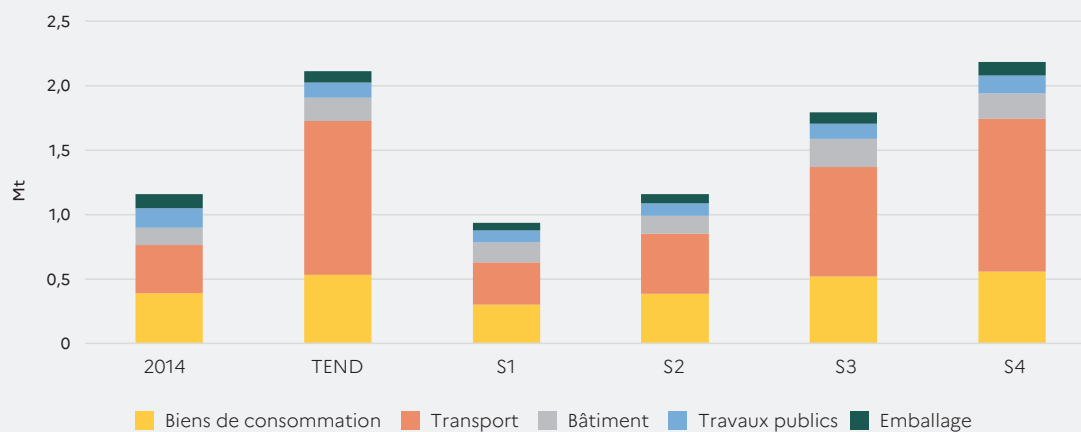
Pour l'aluminium, le résultat est contrasté suivant les scénarios ; la consommation totale, comme le montre le **Graphique 21**, baisse pour S1, est stable pour S2, mais augmente de 55 % dans S3 et de 88 % dans S4 par rapport à la consommation 2014. L'augmentation de la consommation d'aluminium du secteur des transports contribue largement à cette forte augmentation.

S'il n'y a pas d'enjeu critique pour l'aluminium dans S1 et S2, la forte augmentation dans S3 et S4 pourrait poser des problèmes d'approvisionnement. **Pour ces scénarios, la sécurisation des approvisionnements nécessaire à la transition énergétique devraient faire l'objet d'une concertation à l'échelle européenne.**

Graphique 20 Demande totale d'acier par secteur consommateur en 2014 et 2050, par scénario



Graphique 21 Demande totale d'aluminium par secteur consommateur en 2014 et 2050, par scénario



6.3. Verre

La demande actuelle de verre est légèrement supérieure à 5 Mt (en 2014), principalement pour le verre d'emballage et évolue entre 2Mt (S2) et 5,5 Mt (S4) en 2050, tous secteurs confondus. Dans ce contexte, les besoins moyens annuels de verre pour la TE, entre 0,1 et 0,3 Mt/an (entre S1 et S4) représentent de l'ordre de 5 % des besoins 2050. Cette part est plus importante si on la rapporte au secteur du verre plat.

Les gisements pour le verre, comme pour le béton, sont locaux. Il est nécessaire de développer une politique de gestion locale pour assurer un approvisionnement. Le développement d'une politique de collecte, de tri et de recyclage est d'autant plus important pour cette matière afin de limiter l'usage de matières premières vierges.

6.4. Autres métaux et graphite

La consommation française et la production mondiale sont amenées à évoluer pour diverses raisons :

- les productions mondiales vont évoluer dans les 30 prochaines années en particulier pour les métaux de la transition énergétique et numérique (lithium,

cobalt, argent, terres rares, titane et autres non analysés dans ce travail) en raison précisément des perspectives de demande mondiale qui s'accroissent fortement. C'est notamment le cas pour les métaux nécessaires aux batteries des véhicules électriques avec divers projets de sites de fabrications type « gigafactory » en Europe et aux États-Unis pour essayer de contrer la domination asiatique. Les graphiques donnent cependant une idée de ce que représente la demande française par rapport à la production mondiale actuelle ;

- les valeurs tiennent compte uniquement des matières primaires. Une part importante de matières secondaires, issues du recyclage va entrer dans les modes de fabrications des filières. Pour la plupart des technologies des énergies renouvelables par exemple, les matières mobilisées sont accessibles, réutilisables, recyclables et permettent d'envisager un usage pérenne à long terme pour reconstituer, rénover et pérenniser les mêmes infrastructures énergétiques. Or, les bénéfices du recyclage, qui ne sont pas égaux pour toutes les matières et dans l'ensemble des filières, ne sont pas intégrés à l'estimation.

Les données utilisées sont les suivantes :

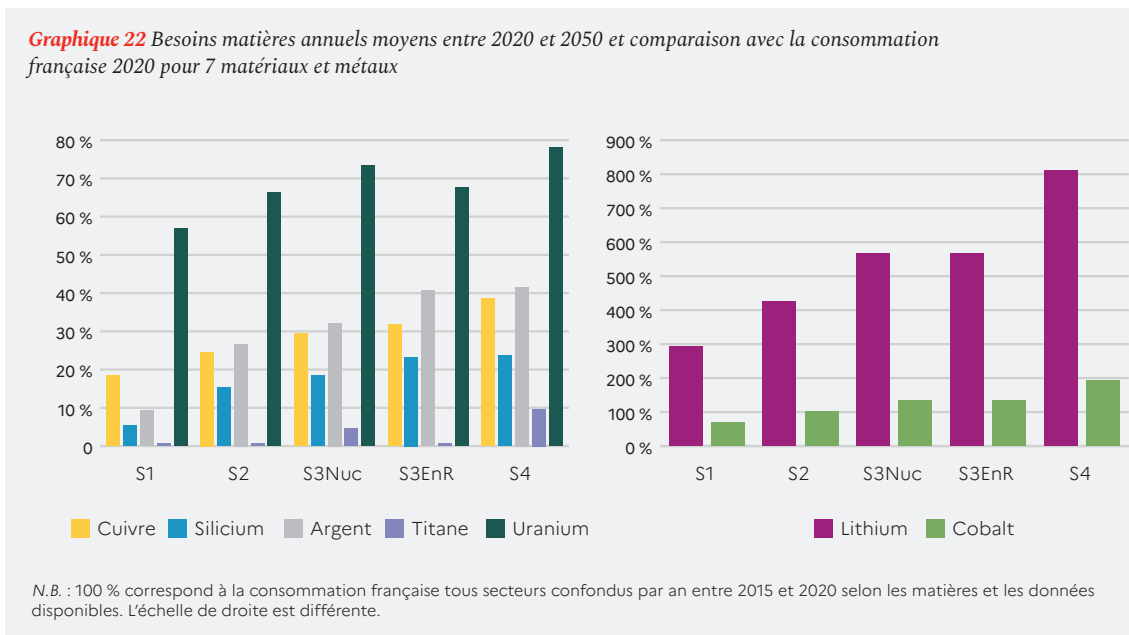
Tableau 3 Consommation française et production mondiale actuelles des différents matériaux et métaux étudiés en tonnes

Tonnes	Consommation française	Production mondiale
Cuivre	504 000	30 053 000
Terres Rares	-	220 000
Silicium	41 000	3 100 000
Argent	235	30 848
Titane	13 072	210 000
Lithium	950	77 000
Cobalt	2 000	132 000
Uranium	8 000	54 752
Nickel	-	2 328 000
Graphite	-	2 450 000

N.B. : les sources des données sont détaillées en [23] et sont représentatives des cinq dernières années.

Par rapport à la consommation française, pour les valeurs disponibles, les besoins pour les matériaux

et métaux se situent de la façon suivante :



D'un point de vue général, à part pour le titane, dans l'ensemble des scénarios le graphique montre que les besoins annuels pour l'ensemble des filières par rapport à la consommation actuelle sont importants (au-delà de 10 %) et atteignent dès S2 ou S3 des taux allant de 30 % à près de 200 % (pour le cobalt utilisé pour les véhicules électriques dans S4). Pour le titane, les besoins annuels sont inférieurs à 1 % de la production mondiale de lingots de titane. **Le besoin de politiques industrielles adaptées pour l'augmentation des capacités de productions ou de recyclage nationales (verres, aluminium) est donc manifeste. Mais les enjeux d'accès aux ressources dépassent les frontières de la France et doivent a minima être envisagés à l'échelle européenne. Dans ce contexte, la sécurisation des approvisionnements nécessaires à la transition énergétique devraient faire l'objet d'une concertation à l'échelle européenne à l'image de la stratégie batterie.**

CUIVRE

Les consommations de cuivre pour les secteurs étudiés dans ce rapport sont comprises entre 20 % et 40 % des consommations françaises tous secteurs confondus. Il faut rappeler ici que les besoins en cuivre pour le développement et le renforcement du réseau électrique ainsi que la numérisation qui sont nécessaires au déploiement des énergies renouvelables ne sont pas estimés et devrait augmenter de façon importante ces valeurs. **Généralement, le cuivre est un élément qui est immobilisé dans des structures avec des durées de vie très longues (bâtiments, réseau électrique...) ce qui entraîne un besoin en cuivre important et un enjeu sur le recyclage très important mais avec des bénéfices différés. Dans ce**

contexte, la sécurisation des approvisionnements nécessaire à la transition énergétique devrait faire l'objet d'une concertation à l'échelle européenne à l'image de la stratégie batterie.

LITHIUM

Concernant le lithium, les besoins s'établissent entre 300 % et 800 % de la consommation française uniquement pour le secteur de la mobilité. Comme pour l'ensemble des matières et davantage encore pour le lithium, le développement des technologies de recyclage en boucle fermée, c'est-à-dire pour le même usage, semble primordial. Tout comme le cuivre, afin que ces productions industrielles puissent être localisées en France, il serait important de mettre en place des stratégies adéquates soit en fiabilisant les importations soit en développant une diplomatie des métaux en lien avec des partenaires européens au travers de contrats sécurisés d'approvisionnement ou de prise de participation dans des industries minières.

COBALT

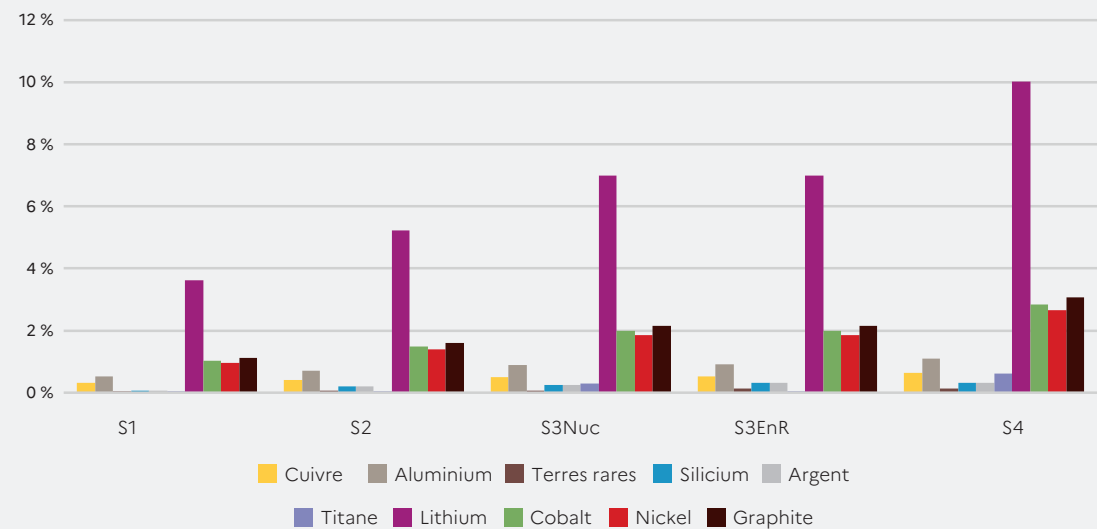
Concernant le cobalt, les besoins s'établissent entre 70 % et 190 % de la consommation française uniquement pour l'application mobilité. **Tout comme le cuivre et le lithium, afin que ces productions industrielles puissent être localisées en France, il serait important de mettre en place des stratégies adéquates soit en fiabilisant les importations soit en développant une diplomatie des métaux en lien avec des partenaires européens au travers de contrats sécurisés d'approvisionnement ou de prise de participation dans des industries minières.**

URANIUM

Les consommations d'uranium diminuent significativement par rapport aux consommations actuelles et ne devraient pas poser de problèmes d'approvisionnement, en fonction de l'évolution du contexte international.

Par rapport à la consommation mondiale, pour les valeurs disponibles, les besoins pour les matériaux et métaux se situent de la façon suivante :

Graphique 23 Besoins matières annuels moyens de la France entre 2020 et 2050 rapportés à la production mondiale 2020 pour 10 matériaux et métaux



Le **Graphique 23** montre que, pour les quatre éléments que sont le cuivre, le silicium, l'argent et le titane, la demande est inférieure à 1 % de la production mondiale, que l'on peut comparer avec la part de la France dans le PIB mondial (1 % actuellement), ce qui permet en première approche de qualifier le caractère peu critique de leur utilisation.

TERRES RARES

Concernant les terres rares, les besoins français apparaissent inférieurs à 0,2 % de la production actuelle mondiale (que l'on peut là aussi comparer à la part du PIB de la France dans le PIB mondial, qui est d'environ 1 %), mais il faut moduler cette vision moyenne avec les limites à prendre en compte exprimées dans la **section 3**. En effet, le déploiement mondial de l'éolien en mer est prédit comme important. De plus, l'exercice n'estime pas les besoins pour le déploiement des batteries qui sont également consommatrices de terres rares. Concernant l'éolien en mer, les besoins se concentrent sur les aimants, c'est-à-dire les matériaux Nd+Pr+Dy. Le besoin mondial pour les

éoliennes en mer à un horizon de 10 ans est estimé à 234 GW en 2030. À raison de 200 tonnes de Nd+Pr+Dy par GW installé, cela représente 46 800 tonnes dont 1 200 à 1 600 tonnes pour le besoin français. Avec une production mondiale de Nd+Pr+Dy estimée à 55 kt/an¹⁰, le besoin mondial pour les éoliennes en mer en 2030 représente 8,5 % de la production actuelle de ces éléments.

Seuls les besoins annuels en métaux (lithium, cobalt, nickel) et graphite des batteries des véhicules, augmentent nettement au-delà de notre part dans le PIB mondial et ce sera très vraisemblablement le cas dans tous les pays. Ainsi à titre d'illustration, selon [24], la production mondiale en équivalent carbonate de lithium (LCE) devrait passer de 230 kt en 2017 à 1 160 kt en 2030 pour satisfaire la demande mondiale. Il faut s'attendre à une mutation forte de l'économie de ces métaux. De fait, la diplomatie des métaux et la recherche de nouveaux gisements sont en cours afin de pourvoir à ces besoins. La sécurisation des approvisionnements de ces métaux devient donc un sujet stratégique qui nécessite une concertation à

¹⁰ Calcul ADEME d'après USGS 2020.

l'échelle européenne, à l'image de la stratégie batterie mise en place en depuis quelques années. En parallèle, le soutien à la recherche et à l'innovation est indispensable afin de modifier les technologies de recyclage des batteries pour atteindre les niveaux de performance de récupération des métaux du futur règlement européen sur les batteries.

6.5. Principales conclusions : des approvisionnements à sécuriser en terres rares pour les éoliennes en mer, en matières pour les batteries des véhicules (lithium, cobalt, nickel, graphite) et en cuivre

L'ADEME a réalisé dans ce document une évaluation des besoins bruts¹¹ des principaux matériaux et métaux nécessaires au déploiement des technologies de production d'électricité et des véhicules électriques dans ses quatre scénarios Transition(s) 2050. Les besoins ont été évalués en valeur absolue, puis rapportés à la production française actuelle ; et comparés à la production mondiale afin de les comparer avec la part de la France dans le PIB mondial (1 % actuellement), ce qui permet en première approche de qualifier le caractère plus ou moins critique de leur utilisation. Il ressort de l'analyse les principales conclusions suivantes :

POUR LES « GRANDS MATÉRIAUX ET MÉTAUX »

- La consommation moyenne annuelle supplémentaire de béton pour les besoins de la transition énergétique évolue de 1,2 à 3 Mt/an selon les scénarios, ce qui est négligeable par rapport à la consommation actuelle de 130 Mt française totale de béton. Cette différence entre scénario peut s'expliquer du fait que le parc PV au sol augmente de S1 à S4. Pour l'éolien terrestre en revanche, le déploiement est presque identique entre tous les scénarios, les besoins matières associés sont donc quasiment égaux. **Ces quantités de béton représentent moins de 5 % des besoins en béton pour le reste de l'économie pour tous les scénarios en 2050.**
- La consommation moyenne annuelle d'acier pour la transition énergétique, entre 1,4 et 2,8 Mt selon le scénario, qui provient à 60 % des besoins de véhicules, est **largement compensée par la baisse de consommation d'acier dans tous les secteurs de l'économie, si bien que la consommation globale baisse dans tous les scénarios, sauf dans S4 où elle évolue faiblement à la hausse (+ 4 %).**

- **Pour l'aluminium et le cuivre**, dont l'utilisation est essentiellement le fait des véhicules (90 % pour l'aluminium et de 75 % pour le cuivre), la consommation annuelle évolue respectivement entre 0,3 Mt/an et 0,7 Mt/an et 0,09 Mt/an et 0,2 MT/an. Ces besoins représentent entre 25 % et 53 % de la consommation actuelle française pour l'aluminium et entre 18 % et 36 % pour le cuivre, mais viennent se substituer en partie à des consommations actuelles dans le secteur de l'automobile. Les quantités annuelles nécessaires croissent de S1 à S4 dans la logique d'une extension du parc de véhicules et de l'évolutions de leurs caractéristiques (gabarit et technologie de traction). Il en résulte une évolution contrastée en fonction des scénarios : pour l'aluminium, les consommations totales baissent dans S1 et S2, mais les besoins pour les véhicules contribuent majoritairement à l'augmentation de la consommation totale, de + 55 % dans S3 et 88 % dans S4. **Le développement du recyclage de ces métaux peut cependant permettre une nette diminution de ces besoins.**

- **Pour le verre**, la consommation moyenne annuelle pour la transition énergétique évolue entre 0,1 Mt/an et 0,3 Mt/an selon les scénarios, ce qui représente entre 2 % et 6 % de la consommation actuelle française. L'utilisation du verre est principalement liée au développement du photovoltaïque (≈ 70 % des usages étudiés ici), la consommation croît de S1 à S4 dans la mesure où le parc installé augmente de S1 à S4.

POUR LES « PETITS MATÉRIAUX ET MÉTAUX »

- Pour l'ensemble des scénarios, les véhicules consomment davantage de nouveaux matériaux spécifiques à la TE (lithium, cobalt, graphite) que le déploiement du PV, de l'éolien ou du nucléaire. Ceci reste à mettre au regard des technologies et des capacités de recyclage existantes et à développer.
- **Concernant le silicium, l'argent et le titane, il ne devrait pas y avoir de difficultés particulières dans la mesure où la demande reste inférieure à la part de la France dans le PIB mondial.**
- Concernant les terres rares, les besoins annuels moyens français apparaissent inférieurs à 0,2 % de la production actuelle mondiale, mais il faut moduler cette vision moyenne, notamment pour les éléments intervenants dans la fabrication des aimants permanents. En effet, dans un contexte où le déploiement mondial de l'éolien en mer est prédit comme important, le besoin français pour les éléments Nd+Pr+Dy en 2050 (pour 47 GW d'éolien en mer) pourrait représenter à lui seul 1,7 % de la

¹¹ Sans prise en compte du recyclage.

production actuelle mondiale de ces éléments, ce qui s'avère supérieur à la part de la France dans le PIB mondial. De plus, l'exercice n'estime pas les besoins pour le déploiement des moteurs de tractions de véhicules qui peuvent également s'avérer consommateurs de terres rares selon les choix technologiques des industriels.

- Les besoins annuels en métaux (lithium, cobalt, nickel) et graphite des batteries des véhicules, augmentent également nettement au-delà de notre part dans le PIB mondial : jusqu'à environ 3 % pour cobalt, nickel et graphite et jusqu'à 10 % pour le lithium. Pour faire face à cette criticité potentielle, le soutien à la recherche pour favoriser le recyclage des batteries en fin de vie est indispensable¹².
- Pour ces petits matériaux et métaux, qui suivent une courbe croissante de demande, l'approche retenue dans cette analyse, basée sur le besoin annuel moyen sur la période 2020-2050 tend à réduire le besoin par rapport au besoin en 2050.
- Dans la logique d'une industrialisation en France des composants qui utilisent le cobalt, le lithium, le graphite, le cuivre et les terres rares, il sera donc important de mettre en place des stratégies adéquates soit en fiabilisant les importations soit en développant une diplomatie des métaux en lien avec des partenaires européens au travers de contrats sécurisés d'approvisionnement ou de prise de participation dans des industries minières. Cette stratégie peut se faire en parallèle d'une relocalisation de certaines productions et du développement du recyclage.
- Pour le nucléaire, les incertitudes sur les données des intensités matières à considérer sur l'ensemble du cycle de vie (*section 4.4*) ne permettent pas de conclure sur l'adéquation entre les besoins annuels moyens et la disponibilité de l'offre des différents matériaux requis. Pas plus qu'elles ne permettent une comparaison directe et fiable des besoins annuels avec ceux des autres filières.

¹² Voir Lettre ADEME recherche de janvier 2022 : <https://infos.ademe.fr/article-recherche/lademe-soutient-linnovation-pour-ameliorer-le-recyclage-et-la-reincorporation-des-materiaux/>.

7. Un travail d'estimation à affiner

En plus des limites aux estimations déjà présentées en [section 2](#), les conclusions de la [section précédente](#) sont à considérer en tenant compte des limites suivantes :

- les besoins en métaux décrits concernent uniquement les besoins directs. Si l'ensemble du cycle de vie était considéré, les besoins en matières seraient plus importants ;
- les impacts de la recherche et développement ne sont pas pris en compte pour les unités de productions d'électricité. Elle pourrait permettre des améliorations technologiques dans les procédés de fabrication qui pourraient diminuer les besoins en matières pour s'adapter à des situations de pénuries de matières comme l'a démontré la filière de l'éolien lors de la flambée des prix des terres rares en 2010 ;
- le recyclage n'est pas pris en compte. Il permettrait de diminuer les besoins en matières premières vierges ; les estimations précédentes permettent de mieux cerner les besoins en matières et métaux dont l'enjeu du recyclage est stratégiquement le plus pertinent. Une estimation des capacités de recyclage des différents métaux et matières dans les filières ainsi que la possibilité de substitution des matières premières vierges par des matières premières de récupération reste à conduire pour préciser ces premières conclusions.

Ces hypothèses pourraient faire l'objet d'analyses plus précises dans le cadre de travaux futurs. De la même façon, il faudrait documenter plus finement les besoins en matières des autres domaines de l'énergie et de la mobilité :

- autres technologies (technologies de production d'EnR thermiques hors réseaux et en réseaux, des combustibles liquides et des gaz renouvelables (hydrogène, méthane), la numérisation des réseaux d'énergies (électricité, gaz, chaleur/froid, carburants/combustibles liquides), autres types de véhicules (lourds, non routiers), les infrastructures réseaux (câbles, postes de raccordement pour les EnR, réseaux routier) ou les infrastructures de recharge des véhicules électriques) ;
- autres matériaux non étudiés (platinoïdes, cuivre pour réseau et *smartgrid*) ;
- autres secteurs d'activités (bâtiment, industrie du numérique, etc.).

8. Annexe : généralités et problématiques des matériaux et métaux pour certaines technologies de la TE

D'un point de vue sémantique, il faut distinguer :

- les métaux rares, qui sont des métaux dont l'abondance moyenne et/ou la disponibilité dans la croûte terrestre (*i.e.* la capacité à se concentrer en gisements) est faible. C'est le cas par exemple de l'indium, du cobalt ou de l'antimoine ;
- les terres rares, qui sont un groupe de métaux de la classification de Mendeleïev composé des 15 lanthanides, de l'Yttrium et, suivant les auteurs, du Scandium qui ne sont pas forcément rares ! Elles ont été dénommées ainsi au moment de leur découverte en raison de leur rareté à l'époque. En réalité, certains de ces 17 métaux sont moins rares que d'autres métaux rares qui n'entrent pas dans ce groupe ;
- les métaux critiques : pour la Commission européenne, un métal ou un minéral est critique s'il est à la fois essentiel dans son usage et sujet à d'éventuelles restrictions d'approvisionnement. Ces restrictions d'approvisionnement peuvent être liées à l'offre (rareté des gisements, coût) comme à des aléas géopolitiques. Même définition pour la France, mais la liste des métaux concernés est différente comme présenté sur le portail français des ressources minérales non énergétiques [22] ;
- les métaux stratégiques, qui sont indispensables aux industries stratégiques d'un pays quels que soient leur abondance et leur lieu de production. En France, les industries stratégiques sont notamment celles de la défense, de la sécurité, de l'aviation, de l'automobile, du numérique et de l'énergie (infrastructures énergétiques).

La France produit très peu de métaux issus de mines. En métropole, de la bauxite est extraite pour faire du ciment ; des mines d'or et de nickel fonctionnent encore en Guyane et en Nouvelle-Calédonie. Le gisement de métal provient principalement des déchets. En 2017, près de 9 Mt de ferrailles, cuivre, plomb et aluminium issus du recyclage ont été incorporés à la fabrication. Soit environ 50 % de la production et 60 % de la consommation de métaux. Un recyclage qui a permis d'économiser 17 Mt CO₂eq et 43 TWh [25].

L'utilisation de toutes les énergies (fossiles, fissiles et renouvelables) nécessite des métaux soit pour construire les infrastructures (puits de pétrole, pipelines, réseaux, tankers, mâts d'éoliennes, socles des modules photovoltaïques en centrale, infrastructures d'enfouissement...), soit pour les équipements (numérique, batteries, aimants permanents, chaudière...), soit pour les combustibles (notamment mines d'uranium...), sans compter le béton et l'eau.

Pour les EnR électriques, les principaux métaux utilisés sont le cuivre, l'aluminium, le cobalt, le fer, le plomb, le lithium, le nickel, le manganèse, les platinoïdes, les métaux des terres rares (néodyme (Nd), ou dysprosium (Dy) principalement pour l'éolien en mer), le molybdène, l'indium, l'argent, le titane, et le zinc, auxquels il faut ajouter le graphite [26]. Il faut également ajouter les métaux nécessaires au développement du numérique pour faire fonctionner le système énergétique (également nécessaire pour les énergies fossiles et fissiles) comme l'or par exemple. Les académies des sciences et des technologies détaillent les éléments nécessaires à la transition énergétique [4].

Les enjeux sur les métaux sont de deux ordres : politiques/industriels/économiques et environnementaux/sociaux. Nous ne développerons pas les enjeux politiques, industriels et économiques, sachant que les enjeux principaux sont de réduire le risque de restriction dans les approvisionnements, et d'accéder aux ressources au plus faible coût possible. Ceci peut se faire soit par la R&D en développant de nouvelles technologies de rupture permettant de s'affranchir des matières dans certains usages, ou en développant des procédés de production des matières qui soient plus économiques, soit en déployant des politiques de sécurisation d'approvisionnement par de l'investissement dans des exploitations minières ou par des accords avec des pays ou des compagnies minières (exemple de l'opportunité de valoriser le lithium présent dans certaines eaux géothermales en France). En matière de maîtrise de l'exploitation, la France produit très peu de métaux mais possède un domaine maritime très important qui fait l'objet d'investigations par l'IFREMER pour en déterminer les potentiels dans le cadre de la Stratégie nationale relative à l'explora-

tion et l'exploitation minières des grands fonds marins du 22 octobre 2015 actualisée en Janvier 2021¹³.

Les enjeux environnementaux et sociaux sont nombreux : épuisement des ressources, dégradation des sols et des paysages, destruction de la biodiversité, pollution de l'air, des sols et de l'eau, risque de catastrophes (effondrements, rupture de barrage des boues d'exploitation, glissement de terrain notamment), consommation d'énergie et d'eau, sans compter les risques de radioactivité pour certains résidus miniers (les gisements de terres rares contiennent de l'uranium et du thorium, ceux de cobalt en RDC du thorium également) ainsi que les conditions sociales d'exploitation.

En matière d'énergie, l'exploitation des mines dans le monde consommerait 8 à 10 % de l'énergie primaire mondiale [27], cette consommation, ramenée à la tonne de métal raffiné, augmente au fur et à mesure de la diminution de la concentration des métaux dans les gisements exploités et de l'éloignement avec l'industrie du raffinage et de la fabrication des métaux. Il s'agit principalement d'électricité à tous les stades du processus mais aussi de carburants, de gaz naturel et de chaleur. Le CNRS a publié des chiffres donnant des exemples de consommation d'énergie pour quelques métaux [28].

À titre illustratif, le gouvernement chilien donne l'évolution croissante de la consommation d'énergie dans les mines de cuivre du Chili [29] passant de 4,75 kWh/tonne de métal raffiné en 2001 à 8,46 kWh/tonne en 2018 soit une progression de 70 % environ. Cet accroissement est principalement dû à la moindre concentration des minerais extraits et à l'éloignement progressif des gisements des ressources en eau, ce qui nécessite d'utiliser progressivement plus d'énergie par tonne de minerai extrait.

Ce simple constat devrait nous inciter dans le cadre de la transition énergétique à diminuer nos consommations de métaux. Pourtant des facteurs tant du côté de l'offre que de la demande poussent plutôt à un maintien voire une augmentation des productions :

- les enjeux économiques car toute diminution de la consommation se traduit par une diminution du chiffre d'affaires du secteur (sauf si les cours augmentent). Or la production minière peut représenter 10 % à 15 % du PIB notamment dans des pays en développement ;
- le fait que certains métaux ne sont extraits que sous forme de co-produits d'autres minerais (par exemple, le sélénium dans les mines de cuivre). Ce qui signifie qu'il faut un gisement suffisant de métal principal pour ouvrir la mine ;

- le fait que la demande en métaux pour les transitions énergétique et numérique qui, compte tenu des technologies actuelles, est très importante et a plutôt tendance à augmenter l'extraction de ces métaux y compris avec des projets pour exploiter les grands fonds marins et les régions polaires (des projets d'exploration de la Lune et même de Mars sont élaborés par les grands groupes miniers et les agences spatiales) ;
- les limites du recyclage. Même s'il peut augmenter (amélioration de la collecte et des technologies de tri, conditions économiques), le recyclage ne pourra compenser la demande, en particulier lorsque celle-ci croît fortement. Et la récupération ne peut pas être totale (pertes de collecte et de tri, concentrations trop faibles pour être récupérées, notamment dans les alliages métalliques ou pour les usages dispersifs comme la peinture au titane ou les cosmétiques) ;
- le peu d'incitation à la substitution par des matériaux renouvelables qui pourraient, dans certains cas, se substituer aux métaux (exemple des mats d'éolienne en bois plutôt qu'en métal, ou en béton).

Pour autant, la dépendance, en particulier des pays développés et la volonté d'abaisser les coûts de production des technologies de la transition énergétique pousse la R&D vers des technologies moins gourmandes (par ex. la diminution de l'épaisseur des plaquettes de silicium dans le PV) voire indépendantes de métaux produits dans les pays les plus à risque. Il y a également la possibilité de développer l'extraction minière en France ou de constituer des stocks stratégiques. Si cette dernière solution ne peut servir qu'à répondre à une rupture d'approvisionnement de quelques semaines à quelques mois, la première dépend des ressources mais aussi de la facilité ou pas d'ouvrir une mine. En France, le sujet est régulièrement évoqué mais se heurte à l'opposition des populations et des associations. En effet, d'après certaines sources, la majorité des parties prenantes rejettent ou peinent à trouver des valeurs ajoutées aux projets miniers [30].

Un autre facteur d'évolution positive est le développement des EnR pour fournir l'énergie des infrastructures minières, ce qui diminuera d'autant leurs impacts sur l'effet de serre et le contenu CO₂ de l'énergie consommée par les mines. Ce développement est d'autant plus nécessaire que les mines sont de plus en plus éloignées des zones habitées, voire installées dans des zones désertiques dans lesquelles les EnR sont indispensables. Certains sites ont même l'objectif de devenir autonomes en électricité grâce à de grandes zones désertiques disponibles, ventées et ensoleillées.

¹³ Comité interministériel de la mer (CIMer) du 22 janvier 2021.

9. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

- [1] **ADEME**, « Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat », Rapport, 2021 (<https://transitions2050.ademe.fr/>).
- [2] **ADEME, Daniel Monfort et al.**, *Projet SURFER, Inventaires des besoins en matière, énergie, eau et sols des technologies de la transition énergétique*, 2020.
- [3] **Bernreuter Research**, *Polysilicon Market Report*, <https://www.bernreuter.com/polysilicon/market-analysis/>.
- [4] **Patrice Christmann**, *Stratégie d'utilisation des ressources du sous-sol pour la transition énergétique française*, Académie des Sciences et Académie des Technologies, mai 2018.
- [5] **ADEME**, *Besoins matières des filières énergétiques*, 2022.
- [6] **ADEME**, *Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergies*, Fiche technique, 2019.
- [7] **Florent Maccario et al.**, *Rapport Annuel de l'Observatoire des Véhicules Hors d'Usage – Données 2018*, ADEME Librairie, 127 pages, 2020.
- [8] **Commission Européenne**, *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020*, 2020 (https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/batteries-and-accumulators_en).
- [9] **Conseil National de l'Industrie – CSF Mines et Métallurgie**, *Développement d'une filière intégrée de recyclage des batteries lithium*, 2020 (<https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-35541-rapport-recyclage-batterie-lithium.pdf>).
- [10] **ADEME, PE INTERNATIONAL, GINKO 21**, *Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux*. ADEME Librairie, 29 p. + 281 p., 2013.
- [11] **ADEME, SPHERA, GINKO 21**, *Analyse de cycle de vie relative à l'hydrogène – Production d'hydrogène et Usage en mobilité légère*, ADEME Librairie, 201 pages, 2020.
- [12] **PFA**, *Les Matériaux pour l'allègement des véhicules*, 16 pages, 2019 (https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2018/06/DT_Materiaux-pour-allegement_V6.pdf).
- [13] **ARGONNE National Laboratory**, *Update of vehicle material composition in the GREET model*, 2020.
- [14] **Copper Alliance/IdTechEx**, *Copper use in e-mobility* (http://www.refreedrive.eu/wp-content/downloads/2018_Coiltech_ReFreeDrive_ECI_CopperUseInE-mobility.pdf), 2018.
- [15] **Transport & Environnement, Lucien Mathieu**, *From dirty oil to clean batteries*, 2021 (https://www.transportenvironnement.org/sites/te/files/publications/2021_02_Battery_raw_materials_report_final.pdf).
- [16] **Öko Institute e.V.**, *Ableitung von Recycling und Umweltanforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken bei innovativen Energiespeichern*, 2016.
- [17] **Claudiu Pavel et al.**, *Substitution of critical raw materials in low-carbon technologies: lighting, wind turbines and electric vehicles*, 2016 (http://publications.europa.eu/resource/cellar/7f3762be-aafe-11e6-aab7-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_2).
- [18] **Mark Kane**, *BMW 5th Generation EV & PHEV Drivetrain In Brief*, 2019 (<https://insideevs.com/news/388794/bmw-5th-generation-drivetrain/>).
- [19] <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/12097/12097-les-solutions-actuelles-de-motorisations-pour-vehicules-electriques-ensps.pdf>.
- [20] **DARLING Guillaume**, *Technique : moteurs électriques*, 2018 (<https://www.guillaumedarding.fr/technique-moteurs-electriques-7609409.html>).
- [21] **Claudiu Pavel et al.**, *Role of substitution in mitigating the supply pressure of rare earths in electric road transport applications*, 2017.
- [22] **BRGM** : <http://www.mineralinfo.fr/page/matieres-premieres-critiques>.
- [23] Source Béton, acier et aluminium : outil PÉPITO développé pour l'ADEME (https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/340-transition-industrielle-prospective-energie-matiere-vers-un-outil-de-modelisation-des-niveaux-de-production.html#/44-type_de_produit-format_electronique) ; Source Terres rares : USGS ; Source Cuivre : Eurostat ; Source Cobalt : INRS ; Source Titane, et Argent : L'Elementarium.
- [24] **Christel Borie**, *Le CSF Mines et métallurgie et l'approvisionnement en métaux et matériaux stratégiques de l'industrie française*. RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT, juillet 2020, n° 99 (<http://Annales.org/re/2020/re99/2020-07-7.pdf>).
- [25] **ADEME**, *Bilan National du Recyclage 2008-2017*, 2020.
- [26] **World Bank**, *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future*, 2017.
- [27] **Bihoux**, *Quel avenir pour les métaux ?*, EDP Sciences, 2010.
- [28] <https://ecoinfo.cnrs.fr/2014/09/03/2-lenergie-des-metaux/>.
- [29] **Colchilco**, *Informe de Consumo de Energía 2018*, 2019.
- [30] https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2021-01/tome_03_projet_minier_et_parties-prenantes_final24032017.pdf.

FEUILLETON TRANSITION(S) 2050

« **Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat** » est une prospective qui peint quatre chemins cohérents et contrastés pour atteindre la neutralité carbone en France en 2050. Ils visent à articuler les dimensions technico-économiques avec des réflexions sur les transformations de la société qu'elles supposent ou qu'elles suscitent.

Le rapport Transition(s) 2050, première étape de cet exercice, a été publié le 30 novembre 2021. Chaque secteur y est détaillé, à savoir ceux qui relèvent de la consommation, du système productif, de l'offre d'énergie, des ressources et des puits de carbone. Il est complété par des feuillets qui apportent un éclairage supplémentaire, en particulier sur les impacts induits.

C'est l'objet du présent ouvrage qui présente une analyse spécifique des besoins en métaux et principaux matériaux pour les technologies à fort potentiel de déploiement que sont les véhicules électriques, les EnR électriques, et le nucléaire.

L'ensemble de ces publications est le résultat d'un travail de deux ans mené par l'ADEME en interaction avec des partenaires extérieurs afin d'éclairer les décisions à prendre dans les années à venir. Car le but n'est pas de proposer un projet politique, ni « la » bonne trajectoire mais de rassembler des éléments de connaissances techniques, économiques et environnementales afin de faire prendre conscience des implications des choix sociétaux et techniques qu'entraîneront les chemins qui seront choisis.

011761



9 791029 719455