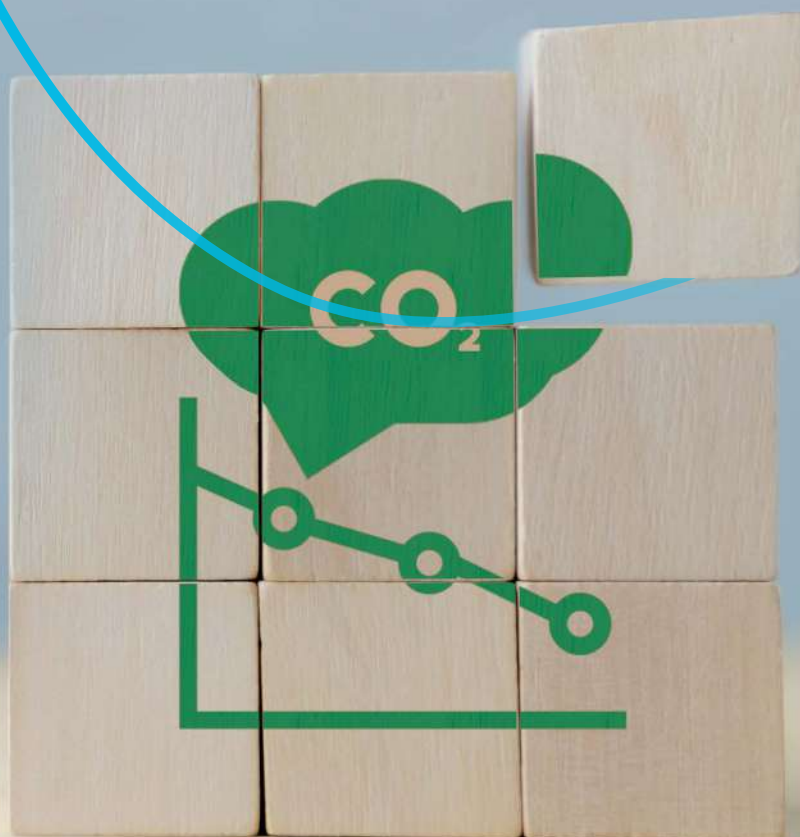


STRATÉGIE NATIONALE **BAS CARBONE** SOUS CONTRAINTE DE RESSOURCES

Une approche intégrée de la transition bas carbone circulaire



Etude réalisée entre janvier et avril 2022.

Equipe INEC : Emmanuelle LEDOUX, Amélie VAZ, Juliette SIMONNETTO, Naomi POIGNANT, Ilona PETIT, Philippine LEVY, Silène LEVILLAIN

Equipe CAPGEMINI INVENT : Alain CHARDON, Clément CHENUT, Pierre-Marin ANDRIOT, Romane DUMARAIS, Benjamin DOUALLE, Mathieu GUERAIN, Marc SALAMEH, Badr Mohammed LABRAIKI, Basile ROGER

Vifs remerciements aux acteurs avec qui des interactions formelles ou informelles ont eu lieu : Nada BENDAHMANE (CSTB), Jean-Louis BERGEY (ADEME), Hortense BRUNIER (GIMELEC), Patrick D'HUGUES (BRGM), Anne-Sophie DE KERANGAL (REGION ILE DE France), Olivia DE MALEVILLE (REGIONS DE France), Jeremy EL BEZE (CSTB), Francis GARRIDO (BRGM), Camille GOLHEN (CSTB), Etienne GOUDAL (GRDF), Sylvain LAURENCEAU (CSTB), Emilie MALLARD (GRDF), Alexis MASSE (GRDF), Julie PACIELLO (CEREMA), Alexandre PAVOINE (CEREMA), Cédric SZABO (AMRF), Jacques VILLENEUVE (BRGM)

Avertissement

Les hypothèses prises dans ce rapport l'ont été dans un but prospectif et d'évaluation en ordre de grandeur. Elles sont le fait du consultant et d'arbitrages du Comité Projet, qui se sont basés sur les sources utilisées et des entretiens informels avec les divers acteurs.

Citation de ce rapport

Emmanuelle LEDOUX, Alain CHARDON, Avril 2022. Stratégie Nationale Bas Carbone sous contrainte de ressources – Une approche intégrée de la transition bas carbone circulaire - Rapport final. INEC, CAPGEMINI INVENT. 144 pages.

Emmanuelle LEDOUX, Alain CHARDON, Avril 2022. Circular low carbon economy – an integrated approach - Final report. INEC, CAPGEMINI INVENT. 144 pages.

Contacts :

e.ledoux@institut-economie-circulaire.fr;
alain.chardon@capgemini.com;
clément.chenut@capgemini.com

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 la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre 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.



ÉDITORIAL INEC



Emmanuelle LEDOUX,
Déléguée Générale de l'INEC

Stratégie nationale bas carbone (SNBC), loi anti-gaspillage pour une économie circulaire, loi climat résilience... Ces dernières années, la France a multiplié les initiatives et les engagements en faveur de l'environnement, signe d'une véritable prise de conscience des limites planétaires et des transformations nécessaires pour en respecter les contraintes. Le risque, cependant, est que cette profusion de textes ne cause une certaine confusion et n'incite les acteurs à se cantonner à leur domaine d'expertise – décarbonation, économie de la ressource, biodiversité... – sans toujours prendre la peine d'évaluer la compatibilité de leurs scénarios respectifs.

Telle est l'ambition de la présente étude : réconcilier deux domaines clés de la transition écologique – la décarbonation et l'économie circulaire – afin de démontrer qu'ils forment un tout et décroïsonner l'écriture des politiques environnementales publiques en analysant la SNBC à l'aune des ressources qu'elle nécessitera. S'appuyant sur des données jusqu'ici négligées et/ou éparses, cette réflexion doit nous permettre de mettre en lumière ce qui n'est aujourd'hui qu'un discret point d'attention dans la SNBC : « s'assurer de la disponibilité des ressources en métaux rares pour les technologies nécessaires à la transition énergétique (...), de l'absence de tension avec d'autres filières bas carbone (...). »

Pour ce travail, nous avons choisi d'étudier le cas de trois grandes filières : l'électrification, la valorisation de la biomasse et la construction. Pour ces secteurs emblématiques et responsables d'externalités majeures, on verra qu'il est possible, en les prenant en compte conjointement, en appliquant les leviers de l'économie circulaire et en rééquilibrant les usages, de desserrer l'étau des contraintes. D'autres filières et secteurs devront faire l'objet d'une analyse approfondie et nous espérons que la présente étude encouragera à mieux planifier l'usage des ressources nécessaires à la transition bas carbone : matières premières, déchets ou surfaces.

Les crises successives traversées par la planète ont prouvé que notre économie et notre mode de vie, fortement dépendants de l'usage des ressources, sont fragiles. La transition vers un modèle souverain et soutenable est désormais une nécessité. Alors que le choix de la planification pour la transition écologique est désormais acté par les institutions, défendre une approche intégrée décarbonation et prise en compte des ressources dans la construction de la prochaine SNBC nous apparaît être une première pierre utile, sinon essentielle, à l'édifice.





ÉDITORIAL

CAPGEMINI INVENT



Alain CHARDON,
Capgemini Sustainability Platforms

Une étude chiffrée, inédite en France, pour poser les enjeux qu'affrontent les entreprises du monde industriel et de l'énergie.

Cette étude examine la transition bas carbone sous l'angle des ressources. Elle rassemble en un seul document des éléments que l'on trouvait séparément dans diverses études existantes, ou qui n'avaient pas encore été évalués. Détaillée de façon très transparente dans le corps de l'étude pour permettre à chacun de s'en emparer, la méthodologie traite des besoins en ressources, des gisements de déchets générés, et des flux circulaires qui répondent aux premiers en retraitant les seconds. Elle évalue ces besoins en tonnage, en valeur, et introduit une évaluation originale en criticité (millions d'euros criticité ou MEC).

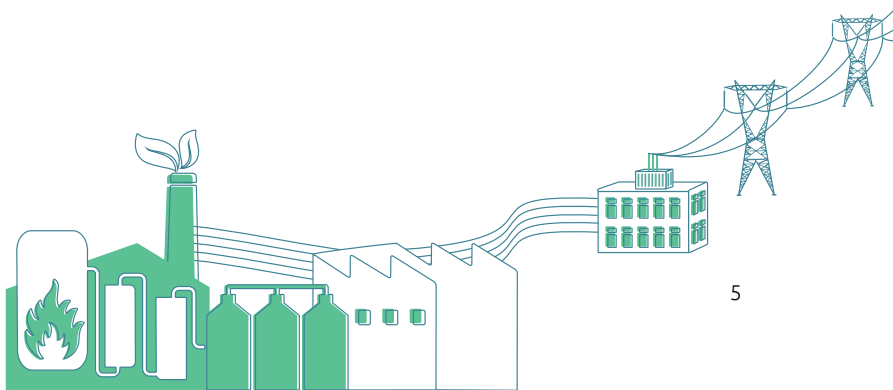
L'étude propose la qualification et le chiffrage des enjeux sur 3 grands secteurs de la transition bas carbone (électrification, bâtiment, valorisation des biomasses) subdivisés au total en 15 domaines et utilisant 14 ressources. Cette grille d'analyse n'est nullement exhaustive, mais elle nous semble représentative des contraintes de criticité et des leviers circulaires à mettre en œuvre.

Si on n'y prend pas garde, une transition bas carbone à faible circularité multiplierait les euros criticité par un facteur 6 sur l'ensemble du périmètre étudié et par 16 sur le seul périmètre des métaux et minéraux, ce qui pose la question de sa faisabilité.

Au contraire dans le cas d'une transition bas carbone accompagnée d'une transition renforcée vers l'économie circulaire, l'étude montre, pour le périmètre étudié :

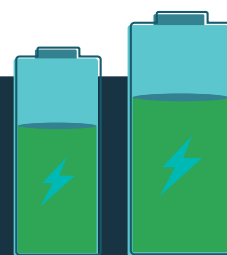
- Une dépendance aux importations de métaux et minéraux réduite de 76%, ramenée de 63 000 millions d'euros.criticité à 14 800 millions d'euros.criticité (à comparer aux 3 800 millions d'euros.criticité de la situation actuelle).
- Des tonnages de déchets nets réduits de 21 Mt/an à 12 Mt/an (16 Mt actuellement)
- Une multiplication par 10 en tonnage, par 25 en valeur et par 75 en millions d'euros.criticité par rapport à aujourd'hui des activités industrielles de recyclage et de réemploi sur le sol français, lesquelles fourniront des matières utiles qu'il ne sera donc plus nécessaire d'importer.

L'étude conclut donc à des gains potentiels élevés et nous espérons qu'elle incitera chaque secteur et chaque famille d'acteurs à préciser à la fois ses chiffres réels et ses objectifs de mise en œuvre d'une stratégie bas carbone circulaire. En effet, la transformation des acteurs économiques, des filières et des territoires vers l'économie circulaire sera nécessairement profonde et doit être entreprise dès à présent.



STRATÉGIE NATIONALE BAS CARBONE SOUS CONTRAINTE DE RESSOURCES

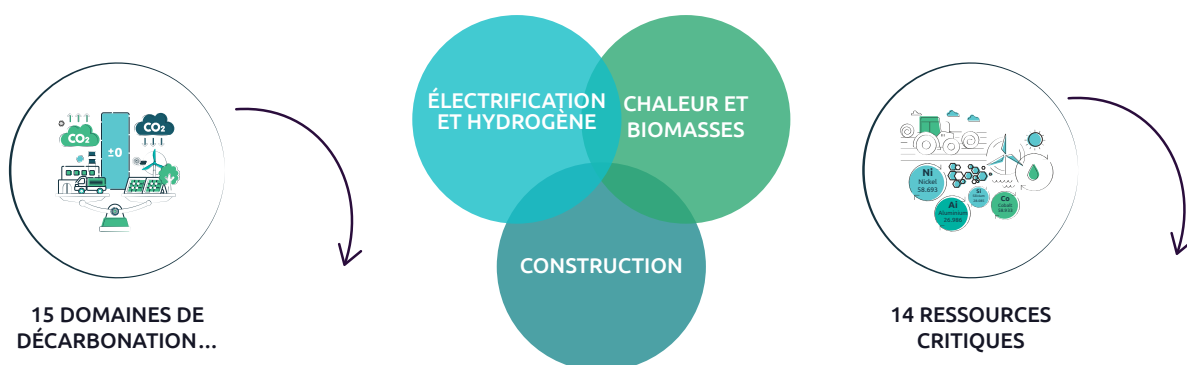
UNE APPROCHE INTEGREE DE LA TRANSITION BAS CARBONE CIRCULAIRE



LES CONTRAINTES DE RESSOURCES, ANGLE MORT DES STRATÉGIES BAS CARBONE

- Les solutions bas carbone ne sont en général évaluées par les entreprises et les Etats que sous l'angle du carbone.
- L'hypothèse est que les ressources seront disponibles, en quantités suffisantes et à prix abordable pour déployer à grande échelle les nouvelles technologies.
- Les crises sanitaires et géopolitiques récentes montrent qu'il n'en est rien.
- Les chaînes d'approvisionnement globalisées et l'économie linéaire - extraire, fabriquer, consommer, jeter - sont fragiles et ne répondront pas aux besoins.
- Depuis deux ans, de plus en plus d'études abordent le sujet - en général limitées à l'électrification et aux métaux, à la criticité - elles traitent éventuellement les volumes, parfois la valeur, jamais une quantification globale de la criticité.
- Cette étude propose une approche complète de la mise en œuvre de la transition bas carbone sous contraintes de ressources, sans et avec circularité renforcée.
- La stratégie nationale bas carbone française (SNBC), dont la prochaine révision s'élabore d'ici 2024, imposera-t-elle partout et en profondeur l'économie circulaire ?

UNE ÉVALUATION COMPLÈTE, PREMIÈRE DU GENRE (1/2) COUVRIR L'ÉLECTRIFICATION, LA BIOMASSE, LA CONSTRUCTION



- Véhicules électriques
- Véhicules hydrogène
- Production H2 par électrolyse
- Pompe à chaleur
- Nucléaire
- Éolien terrestre
- Éolien en mer
- Solaire photovoltaïque
- Réseaux électriques

- Réseaux de chaleur
- Géothermie profonde
- Biomasse gazeuse
- Biomasse solide
- Bâtiment neuf
- Bâtiment rénovation

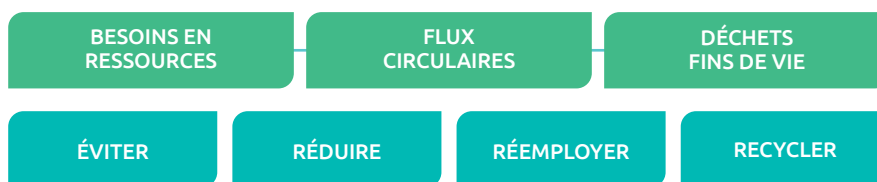
- Lithium
- Cobalt
- Platinoïdes
- Terres rares
- Cuivre
- Graphite
- Silicium
- Aluminium
- Nickel
- Bois-Forêt
- Agriculture
- Déchets urbains et industriels
- Acier
- Béton

UNE ÉVALUATION COMPLÈTE, PREMIÈRE DU GENRE (2/2) : ÉVALUER EN TONNES, EN EUROS, EN EUROS.CRITICITÉ

Une étude en ordre de grandeur, qui privilégie la complétude de la vision
Les filières pourront s'approprier la méthode et préciser les chiffres

PARCE QUE LES VOLUMES COMPTENT

Les volumes sur le cycle de vie complet, par domaines et par ressources
Les volumes gagnés avec chaque levier de l'économie circulaire



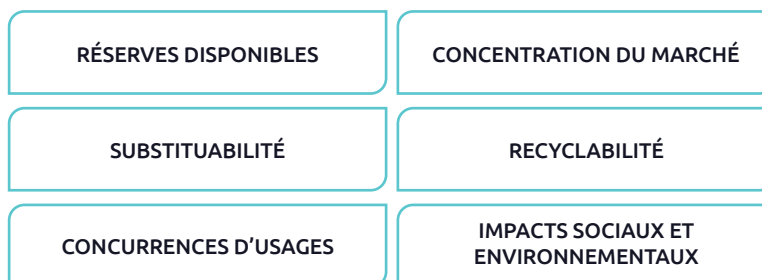
Sans oublier les volumes de biomasses réellement disponibles pour une transition
bas carbone respectueuse des autres besoins et de l'environnement

PARCE QUE LA VALEUR COMPTE

Prise en compte du coût à la tonne des ressources
Valeur d'importations pour les métaux et minéraux hors béton

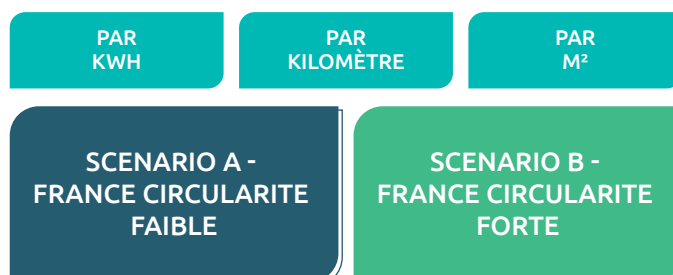
PARCE QUE LA CRITICITÉ DES RESSOURCES COMPTE

Des scores de 1 à 5 sur six dimensions, traduits en criticité de 1 à 100 (puissance de l'impact global)



PARCE QUE LA VALEUR CORRIGÉE PAR LA CRITICITÉ COMPTE

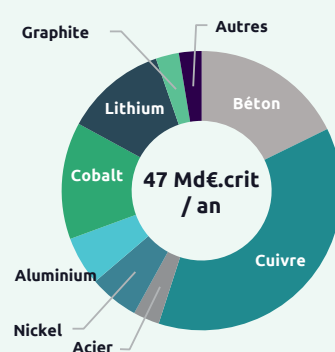
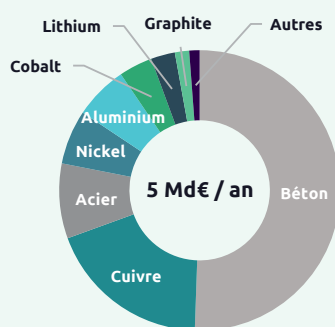
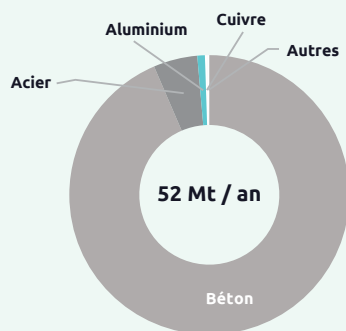
L'étude propose une unité de compte inédite : les euros.criticité
Pour corriger la valeur par la criticité géostratégique mais aussi environnementale
Utilisée pour les merit orders par technologies et pour les scénarios à l'échelle du pays



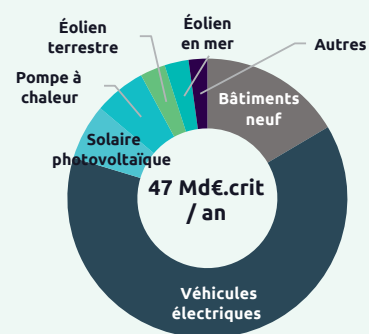
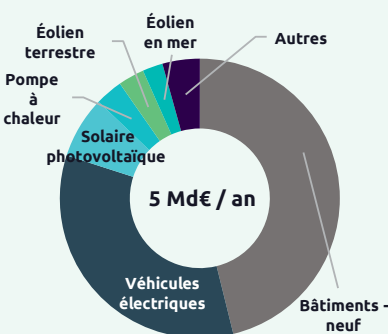
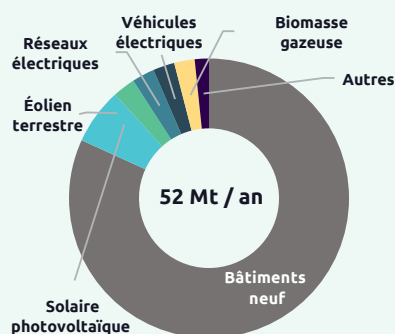
UNE TRANSITION BAS CARBONE A CIRCULARITÉ FAIBLE NE PERMETTRA PAS DE FAIRE FACE AUX BESOINS EN RESSOURCES

Dans le scénario A à circularité faible, des besoins nets en très forte augmentation : Réussir la transition bas carbone en économie linéaire : un défi (in)atteignable ?

Besoins nets moyens annuels par ressource
(période 2020-2050)



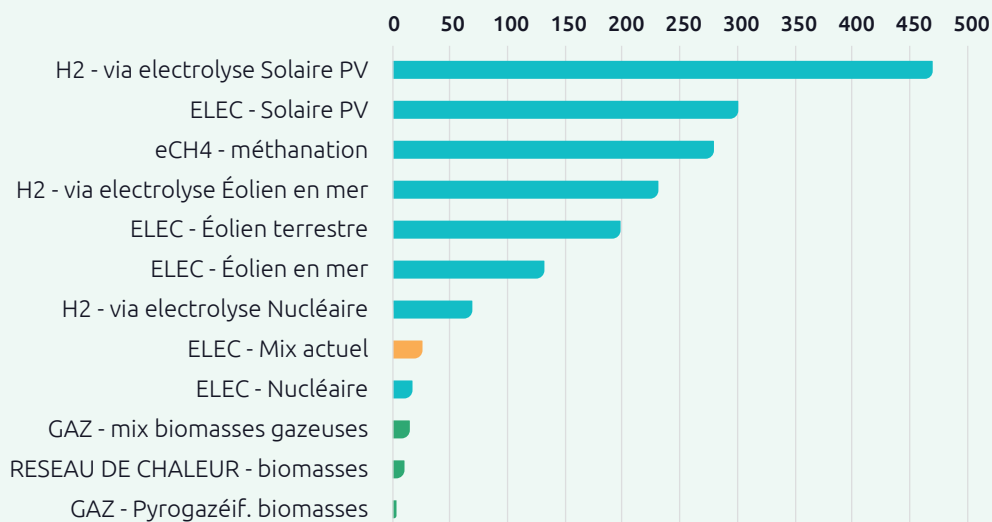
Besoins nets moyens annuels par domaine
(période 2020-2050)



Prendre en compte la criticité des ressources pour choisir les stratégies nationales de mix de solutions et pour progresser sur les technologies

ÉNERGIE

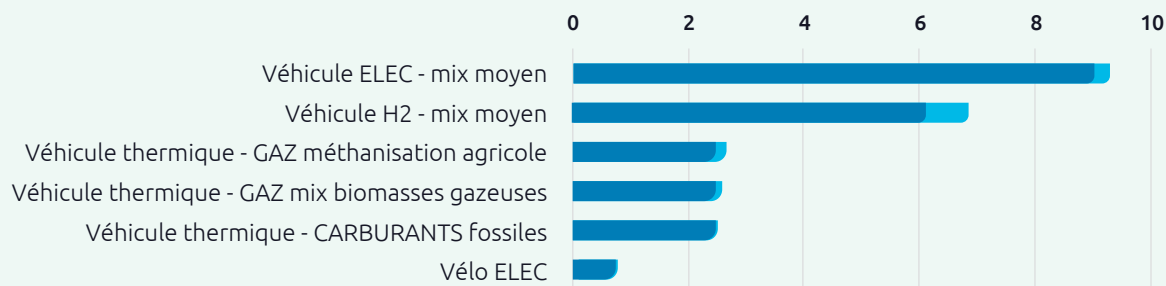
Les solutions biomasse moins intenses en ressources que les solutions high-tech
(centimes €.criticité / kWh)



TRANSPORTS

Alléger, requestionner le tout électrique ?

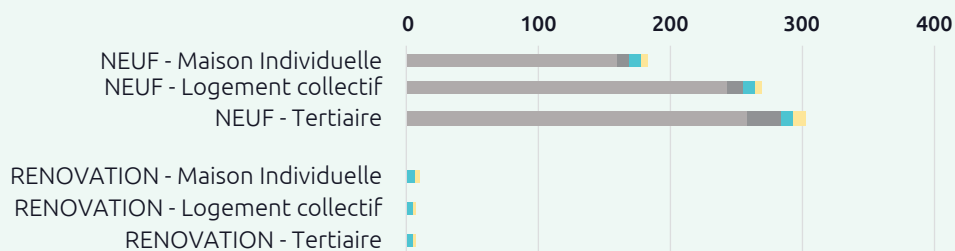
(centimes €.criticité / km, partie carburant en couleur claire)



CONSTRUCTION

La rénovation moins consommatrice que la construction neuve

(centimes €.criticité / m²)

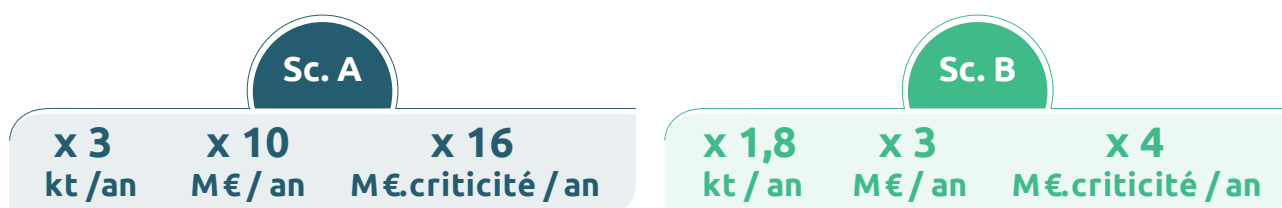


■ Béton ■ Acier ■ Aluminium ■ Autres

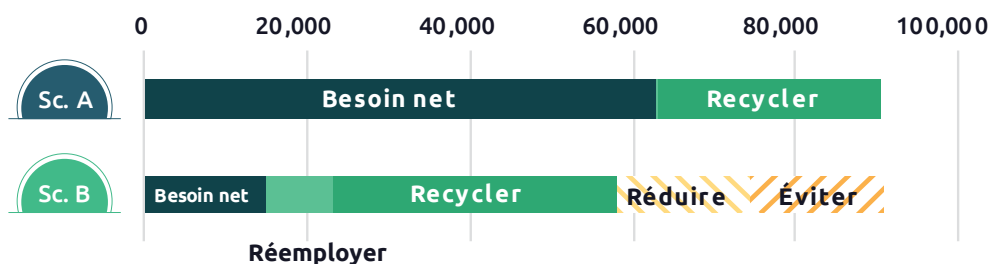
SI ON N'Y PREND PAS GARDE : CRITICITÉ MULTIPLIÉE PAR 16

DIFFERENCE ENTRE SCENARIO A - FAIBLEMENT CIRCULAIRE SCENARIO B - AVEC CIRCULARITE RENFORCÉE

Par rapport à aujourd'hui, les besoins nets en métaux et minéraux seront multipliés d'ici 2050 par un facteur :

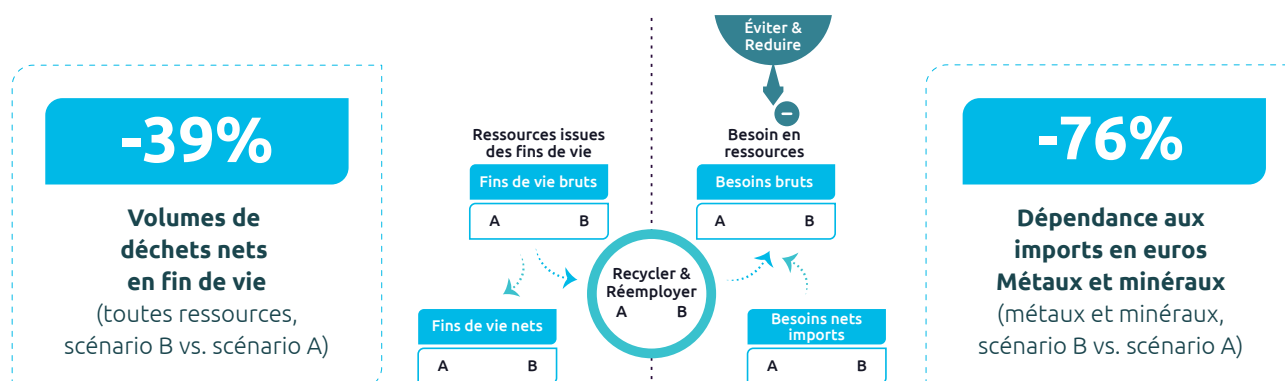


Les efforts de sobriété (Éviter et Réduire) et une plus forte circularité permettent une nette diminution des besoins en ressources
(métaux et minéraux, M€.crit / an, estimation 2050)



L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE POUR RÉUSSIR LA TRANSITION BAS CARBONE

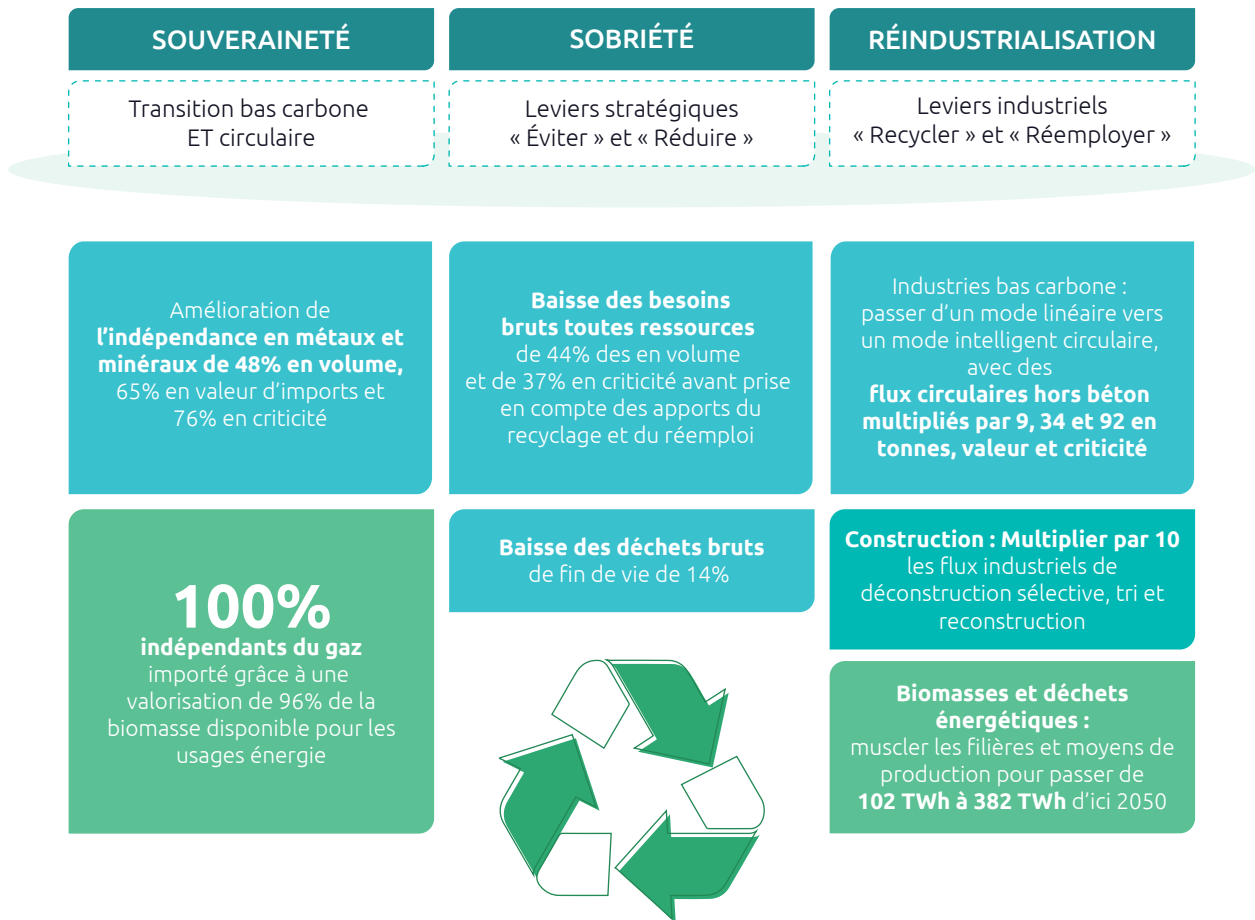
AVEC UNE REINDUSTRIALISATION CIRCULAIRE, SOUVERAINE ET RÉSILIENTE ABAISSE LA PRESSION DE 76%



x10, x25, x75

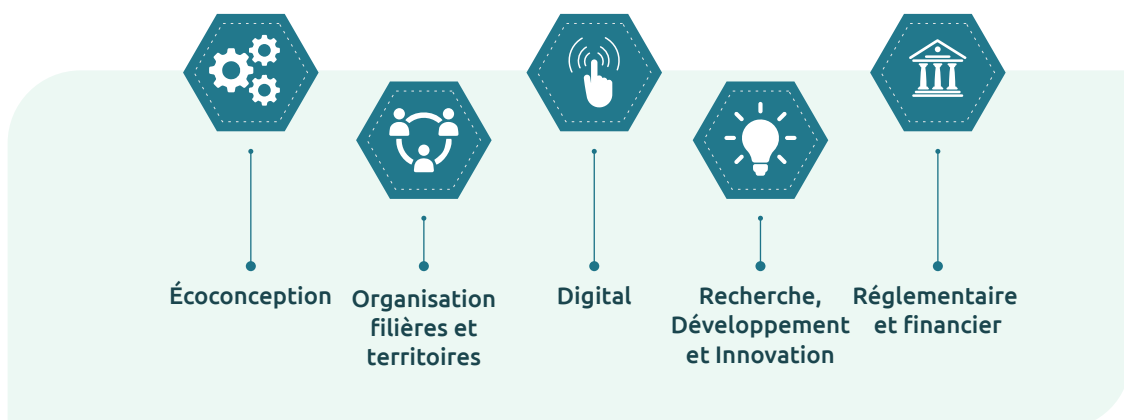
Activité industrielle de recyclage / réemploi en France : x10 en tonnage, x 25 en valeur et x75 en millions d'euros.criticité (toutes ressources. scénario B vs. aujourd'hui)

3 ENSEIGNEMENTS MAJEURS POUR UNE FRANCE BAS CARBONE ET RÉSILIENTE



5 PRIORITÉS DE PASSAGE A L'ACTION POUR LES ENTREPRISES, LES TERRITOIRES ET LES POUVOIRS PUBLICS

L'étude détaille les éléments concrets nécessaires au passage d'une économie linéaire vers une économie bas carbone circulaire, à mettre en oeuvre dès maintenant.



SOMMAIRE

1 UNE APPROCHE MULTISECTORIELLE INÉDITE QUI ASSOCIE DÉCARBONATION ET CONTRAINTE DE RESSOURCES

- 1.1 Un impératif : prendre en compte les ressources dans la construction de la SNBC
- 16
- 1.2 Les hypothèses : définition de la criticité et choix sémantiques
- 20
- 1.3 Deux scénarios à circularité faible ou renforcée pour matérialiser les enjeux
- 30

2 CIRCULARITÉ ET DÉCARBONATION : LES GRANDS ENSEIGNEMENTS

- 2.1 Souveraineté, sobriété, industrialisation du réemploi : trois enseignements clés pour une France bas carbone, circulaire et plus résiliente
- 33
- 2.2 Cahier des résultats quantitatifs
- 42
- 2.3 L'électrification : une filière au cœur de la décarbonation, mais qui dépend largement de ressources importées
- 58
- 2.4 La valorisation des biomasses, indispensable dans la poursuite de la souveraineté énergétique, doit être organisée dans le respect des différents usages
- 73
- 2.5 Les volumes pèsent sur la filière de la construction mais peuvent être drastiquement réduits avec une approche circulaire
- 81

3 ACTIONNER LES LEVIERS TRANSVERSES POUR PERMETTRE LA MISE EN PLACE DE LA CIRCULARITÉ

- 3.1 Articuler les réglementations en faveur de l'économie circulaire et de la décarbonation
- 89
- 3.2 Flécher les financements vers les projets vertueux en ressources
- 91
- 3.3 Passer de l'innovation à la norme pour l'écoconception des produits et services
- 93
- 3.4 Créer les conditions de l'indépendance des ressources en réorganisant l'économie sur le territoire
- 95
- 3.5 Soutenir la R&D et l'innovation est nécessaire pour mieux préserver les ressources
- 97
- 3.6 S'appuyer sur la digitalisation pour mettre en œuvre les stratégies d'économie circulaire
- 101

4 ANNEXE I MÉTHODOLOGIE

- 4.1 Hypothèses Scénarios A et B
- 103
- 4.2 Flux bruts, flux circulaires et flux nets
- 106
- 4.3 Hypothèses ERRR : tableau des %
- 108
- 4.4 Scores détaillés : criticité, leviers circulaires
- 122
- 4.5 Hypothèses pour la quantification MEC : prix à la tonne
- 123
- 4.6 Limites de l'étude et pistes d'approfondissement par les parties prenantes
- 132
- 4.7 Bibliographie
- 137

ANNEXE II FICHES DOMAINES ET RESSOURCES

ANNEXE III RÉSULTATS QUANTITATIFS



1 UNE APPROCHE MULTISECTORIELLE INÉDITE QUI ASSOCIE DÉCARBONATION ET CONTRAINTE DE RESSOURCES

Les enjeux environnementaux, de décarbonation et de circularité sont, le plus souvent, étudiés parallèlement. Cette étude vise à combler cette lacune et à porter sur la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) un regard qui tienne compte non seulement des contraintes climatiques, mais aussi des contraintes pesant sur les ressources.

Le présent rapport est structuré en trois parties :

- Cette première partie, qui présente le contexte et expose la démarche de l'étude ;
- Une deuxième partie, qui détaille les principaux enseignements tirés de l'analyse fine de deux scénarios à circularité plus ou moins élevée, appliqués à trois filières structurantes (électrification, valorisation des biomasses, construction) ;
- La troisième partie, enfin, qui apporte des préconisations éclairées pour faire de l'économie circulaire un véritable levier de décarbonation.



1.1 UN IMPÉRATIF : PRENDRE EN COMPTE LES RESSOURCES DANS LA CONSTRUCTION DE LA SNBC

70 % des émissions de gaz à effet de serre sont générées par l'extraction de ressources, leur transformation et la fabrication de biens de consommation (source : The Circularity Gap report 2021, Circle Economy). Il apparaît donc incontournable d'intégrer des stratégies d'optimisation de l'utilisation des ressources aux politiques de décarbonation. En outre, les chantiers de transformation nécessaires à la décarbonation seront eux-mêmes consommateurs de ressources, et donc dépendants de leur disponibilité.

Pourtant, ces enjeux primordiaux que sont la disponibilité des ressources et les risques qui leur sont associés (tensions géopolitiques, ruptures d'approvisionnement, raréfaction de matériaux stratégiques, etc.), sont à peine effleurés dans la dernière mouture de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) publiée en mars 2020. Si le document préparatoire de la SNBC2, publié par la DGEC en janvier 2020, avait appelé de ses vœux le développement de l'économie circulaire dans l'industrie et la grande consommation et si la SNBC mentionne le paramètre de la disponibilité des métaux rares, aucune conséquence n'en a été tirée en termes de trajectoire stratégique. La SNBC ne considère pas la disponibilité des ressources de manière globale (minerais, eau, biomasse, etc.) alors que l'ensemble des secteurs seront impactés par cette contrainte (bâtiment, agriculture, transport, industrie, infrastructures énergétiques, etc.).

Les objectifs de décarbonation ne pourront être atteints sans une modélisation précise des ressources nécessaires et disponibles pour chacun des aspects de la SNBC. Quels volumes de métaux, de minéraux, de biomasse, de sable et de granulats pour le béton faudra-t-il ? Quelles seront les nouvelles sources de tensions stratégiques, économiques, environnementales et sociales ? Les nouvelles ressources seront-elles plus facilement disponibles que les ressources d'extraction importées dont nous cherchons à nous affranchir ? Parallèlement, quels sont les volumes de déchets qu'engendreront les déconstructions massives des équipements obsolètes ? En d'autres termes, la mise en œuvre de la SNBC est-elle réaliste, et à quelles conditions ?

Prévue avant le 1er juillet 2024, la révision de la SNBC est l'occasion pour les pouvoirs publics de se saisir de ces enjeux de ressources et de les inscrire dans la politique de décarbonation. Celle-ci sera précédée d'une loi de programmation quinquennale sur l'énergie et le climat (LPEC) d'ici le 1er juillet 2023 et de la révision de la Programmation pour l'Énergie (PPE) (2024-2033).

Ces trois documents, qui forment la stratégie française pour l'énergie et le climat (SFEC), se doivent d'intégrer les contraintes de ressources. De cette manière, la SFEC entrera en résonance avec d'autres stratégies environnementales nationales telles que la feuille de route Économie circulaire (FREC), la loi Climat et résilience ou encore la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire (AGEC), qui, en favorisant une meilleure utilisation des ressources, concourent toutes à la décarbonation de notre économie.

La présente étude se propose d'aborder de façon globale les enjeux à la fois quantitatifs et qualitatifs que soulèvent les contraintes de ressources pesant sur la SNBC. L'objectif est de donner de la visibilité sur l'ensemble de la chaîne de valeur des ressources nécessaires pour atteindre les objectifs de décarbonation de la SNBC compte-tenu :

- Des objectifs de diminution de la consommation énergétique dans les divers secteurs ;
- Des besoins pour le développement des secteurs énergétiques associés ;
- Des besoins pour le développement des équipements et des systèmes liés aux usages.

Figure 1: De nombreux textes sur la décarbonation et l'économie circulaire...
et un angle mort à l'intersection des deux sujets



SNBC x ÉCONOMIE CIRCULAIRE ?

PEU OU PAS DE TEXTES DISPONIBLES

La SNBC s'inscrit dans un cadre européen ambitieux

La Stratégie nationale bas carbone (SNBC) est issue des engagements européens^[1] qui imposent aux Etats d'élaborer des stratégies de développement à faible intensité de carbone.

Très dense, ce cadre normatif européen s'est encore considérablement renforcé avec la publication en décembre 2019 par la Commission européenne du "Green Deal" ou Pacte Vert pour l'Europe. L'objectif affiché est de rendre l'Europe neutre sur le plan climatique en 2050. Ce cadre comporte de nombreux éléments sur les objectifs et les moyens, mais très peu sur les contraintes de ressources.

Pour y parvenir, le Green Deal est décliné dans une série de dispositifs et de stratégies publiés en 2020 : une stratégie industrielle pour l'Europe, un plan d'action en faveur de l'économie circulaire en cours de révision, et une stratégie pour la biodiversité.

La Commission européenne a ensuite publié un certain nombre de stratégies sectorielles, sur l'agriculture, l'énergie, l'hydrogène, le méthane, les énergies renouvelables en mer et la rénovation énergétique des bâtiments.

Par ailleurs, la "loi européenne sur le climat" du 30 juin 2021^[2] est venue fixer un nouvel objectif contraignant de 55 % de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici à 2030 par rapport aux niveaux de 1990. L'ensemble des acteurs économiques se doivent donc d'atteindre cet objectif intermédiaire avant la neutralité carbone en 2050, laquelle est définie comme l'équilibre entre les émissions de gaz à effet de serre et les puits de carbone.

En vue d'atteindre la neutralité en 2050, la Commission européenne a présenté le 14 juillet 2021 le paquet "Fit for 55", constitué d'un corpus de propositions législatives : une proposition de modification de l'actuel marché carbone européen^[3], une révision de la législation sur l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie (UTCATF)^[4], le rehaussement des objectifs climatiques dans le règlement sur la répartition de l'effort^[5] ("effort sharing") par secteur d'activité. Un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF)^[6] a également été adopté par le Parlement européen en mars 2021 en vue de contrer le risque de fuite du carbone.

- Le Paquet Climat a également révisé les ambitions en matière de politique énergétique, tant en ce qui concerne le développement des énergies renouvelables que l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction de la consommation d'énergies polluantes. La directive sur les énergies renouvelables a réhaussé de 32 % à 40 % leur part dans le mix énergétique d'ici 2030. La proposition de directive sur les énergies renouvelables^[7] promeut également le développement de carburants renouvelables tels que l'hydrogène vert dans les secteurs de l'industrie et du transport. La Commission propose en outre une révision de la directive relative à l'efficacité énergétique avec pour objectif la réduction de la consommation énergétique primaire à 36 % et finale à 39 % d'ici à 2030. Sont particulièrement visés les secteurs des transports, du bâtiment, des technologies de l'information et de la communication (TIC), et de l'industrie. Enfin, la directive sur la taxation énergétique^[8] doit également être révisée avec une modification de la structure des taux de taxation, l'élargissement de la base d'imposition et la suppression des exonérations et réductions existantes. Ceci complète la tarification du carbone dans le cadre des échanges de quotas d'émissions du SEQUE-EU, et se traduit par l'introduction de niveaux de taxation plus élevés pour les combustibles et carburants fossiles, et la suppression de désavantages pour les technologies propres.

La Commission a également émis plusieurs propositions de dispositifs portant sur la mobilité carbonée. La législation relative au déploiement de l'infrastructure servant à recharger ou ravitailler les véhicules en carburants alternatifs^[9] sera révisée, et la législation concernant les émissions de CO2 des voitures et camionnettes^[10] prévoit la réduction de 100 % des émissions des nouveaux véhicules en 2035 par rapport aux objectifs de 2021, signifiant ainsi la fin des véhicules à essence et diesel actuels. Les propositions RefuelEU Aviation^[11] et FuelEU Maritime^[12] visent également à accélérer la décarbonation des secteurs de l'aviation et du transport maritime.

Le cadre national (cf.3.1) et européen affiche donc des objectifs ambitieux en matière de décarbonation. Son application doit renforcer le lien nécessaire avec l'utilisation des ressources : leur disponibilité sur le territoire européen, notamment en ce qui concerne les matériaux rares, leurs contraintes d'approvisionnement et leur coût doivent être pris en compte. La prévention de leur utilisation et leur valorisation maximale doivent être également systématiquement recherchées dans les politiques climatiques.

[1] Paquet Energie-Climat ; Règlement n°525/2013 du 21 mai 2013 relatif à un mécanisme pour la surveillance et la déclaration des émissions de gaz à effet de serre

[2] Règlement (UE) 2021/1119 du Parlement européen et du Conseil du 30 juin 2021 établissant le cadre requis pour parvenir à la neutralité climatique

[3] Proposition de directive du Parlement européen et du Conseil du 14 juillet modifiant la directive 2003/87/CE établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans l'Union, modifiant la décision (UE) 2015/1814 concernant la création et le fonctionnement d'une réserve de stabilité du marché pour le système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre de l'Union et le règlement (UE) 2015/757

[4] Proposition de Règlement du Parlement européen et du Conseil du 14 juillet 2021 modifiant le règlement (UE) 2018/841 en ce qui concerne le champ d'application, la simplification des règles de conformité, la fixation des objectifs des États membres pour 2030 et l'engagement dans la réalisation collective de la neutralité climatique d'ici à 2035 dans le secteur de l'utilisation des terres, de la foresterie et de l'agriculture, et le règlement (UE) 2018/1999 en ce qui concerne l'amélioration de la surveillance, des rapports, du suivi des progrès et de la révision

[5] Règlement (UE) 2018/842 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif aux réductions annuelles contraignantes des émissions de gaz à effet de serre par les États membres de 2021 à 2030 contribuant à l'action pour le climat afin de respecter les engagements pris dans le cadre de l'Accord de Paris et modifiant le règlement (UE) no 525/2013

[6] Proposition de règlement du Parlement Européen et du Conseil du 14 juillet 2021 établissant un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières

[7] Proposition de directive du Parlement européen et du Conseil modifiant la directive (UE) 2018/2001, le règlement (UE) 2018/1999 et la directive 98/70/CE en ce qui concerne la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, et abrogeant la directive (UE) 2015/652

[8] Proposition de directive du Conseil du 14 juillet 2021 restructurant le cadre de l'Union de taxation des produits énergétiques et de l'électricité (refonte)

[9] Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs et abrogeant la directive 2014/94/UE du Parlement européen et du Conseil

[10] Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil modifiant le règlement (UE) 2019/631 en ce qui concerne le renforcement des normes de performance en matière d'émissions de CO₂ pour les voitures particulières neuves et les véhicules utilitaires légers neufs conformément à l'ambition accrue de l'Union en matière de climat

[11] Proposition de règlement du 14 juillet 2021 du Parlement européen et du Conseil relatif à l'instauration d'une égalité des conditions de concurrence pour un secteur du transport aérien durable

[12] Proposition de règlement du 14 juillet 2021 du Parlement européen et du Conseil relatif à l'utilisation de carburants renouvelables et bas carbone dans le transport maritime et modifiant la directive 2009/16/CE



1.2 LES HYPOTHÈSES : DÉFINITION DE LA CRITICITÉ ET CHOIX SÉMANTIQUES

Pour rapprocher les économies bas carbone et circulaire, il nous a fallu faire des choix et prendre des hypothèses. Tout en ayant conscience de leur caractère nécessairement restrictif, ces partis pris ont été guidés par la volonté d'obtenir des résultats représentatifs, lisibles et exploitables. À cet effet, notre travail s'est appuyé sur quatre grands principes :

1. Étudier conjointement 3 filières clés

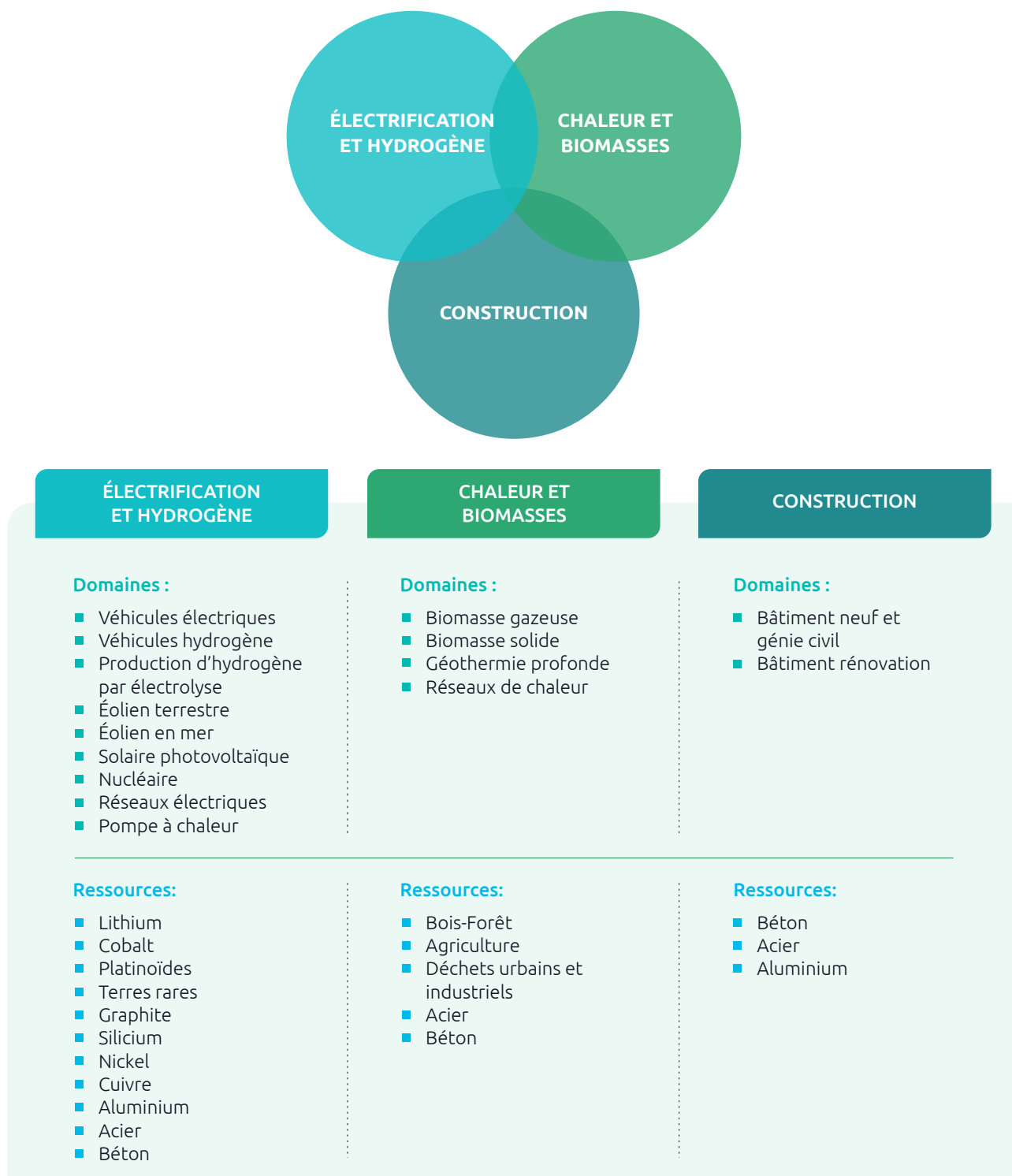
Bien que les enjeux de la décarbonation et de ressources s'imposent à tous les secteurs d'activité, il ne pouvait être question de les passer en revue de manière exhaustive. Nous avons donc fait le choix de nous restreindre à trois grandes filières – l'électrification (y compris l'hydrogène¹), la chaleur et la valorisation des biomasses, et la construction –, qui couvrent au total quinze domaines d'activité (Figure 2).

Du point de vue de la SNBC et des questions de ressources, l'étude conjointe de ces trois filières nous a semblé pertinente, d'une part, parce qu'elles sont chacune appelées à jouer un rôle majeur dans la décarbonation et, d'autre part, parce qu'elles illustrent parfaitement les enjeux liés aux ressources. Elles présentent chacune une certaine homogénéité du point de vue des ressources clés qui leur sont nécessaires (nous en avons sélectionné quatorze, récapitulées Figure 2). Les traiter côte à côte permet d'aborder de façon globale les questions d'indépendance économique et énergétique, de valorisation des déchets, et de compétition des usages pour les ressources, trois enjeux clés d'une économie bas carbone circulaire et résiliente.



¹ Hydrogène et électrification sont étroitement liés à de nombreux égards : électrolyse, motorisation électrique, approches industrielles high tech, vecteurs de rang élevé pour un usage direct des énergies primaires (biomasse, géothermie...).

Figure 2: Les domaines et les ressources étudiés sont couverts par trois filières cohérentes : électrification et hydrogène, chaleur et biomasses, et construction.



Ces trois filières partagent des ressources homogènes. Elles peuvent se substituer, se compléter ou entrer en concurrence. La filière construction sert le bâtiment et le génie civil des deux filières électrification et chaleur et biomasses.

2. Tirer parti des travaux existants

Ce rapport s'appuie sur les nombreuses publications, en général très éclairées et détaillées, de la sphère de la transition climat et de l'économie circulaire. En particulier, il reprend l'approche proposée par l'ADEME (cf. 1.2.2; cf. 1.2.3.), notamment dans la publication « Transition(s) 2050 » de novembre 2021, dont :

- les 7 piliers de l'économie circulaire et notamment l'approche « ERRR » ;
- le scénario S3 avec quelques adaptations (cf. 1.3). Le scénario S3 propose une approche tant circulaire que technologique s'appuyant sur des leviers transverses de transformation.

3. Évaluer la criticité des ressources de façon multifactorielle

Les quatorze ressources examinées présentent des caractéristiques tout à fait différentes, ce qui les rend souvent difficile à comparer. Pour y parvenir malgré tout, nous avons cherché à établir une grille de lecture originale, commune à ces ressources, et une approche multi-critères (6 dimensions) permettant d'obtenir un score de criticité synthétique (cf. 1.2.1).

4. Quantifier les flux

Modéliser la circularité autour des quatre axes Éviter, Réduire, Recycler, Réemployer (ERRR) permet d'évaluer les flux susceptibles d'être diminués et circularisés. En soustrayant ces volumes circulaires aux volumes

bruts, on en déduit, d'une part, les fins de vies nettes, destinées à l'enfouissement en centre de stockage ou au recyclage de bas niveau, et, d'autre part, les besoins nets « linéaires » de matière qu'il restera à importer ou à extraire du sous-sol pour la construction des équipements neufs de la SNBC.

Ces flux bruts, nets et circulaires sont quantifiés en volume (tonnes), en valeur (euros) et en criticité. Pour cette dernière, nous avons introduit une unité spécifique, le million d'euros.criticité (MEC). Cette nouvelle approche vis-à-vis des flux et des volumes apporte une image plus parlante des besoins en ressources envisagés à différents horizons de temps.

1.2.1 La criticité : un score pour synthétiser une notion protéiforme

Selon les domaines et les ressources examinés, la qualification de critique ne signifie pas toujours la même chose, ou, plutôt, elle n'est pas toujours due aux mêmes facteurs. C'est pourquoi nous avons identifié 6 dimensions qui contribuent à la criticité d'une ressource et que l'on peut pondérer pour aboutir à un score unique et comparable.

La première de ces dimensions concerne les réserves disponibles. La ressource est-elle géologiquement rare ? Faut-il s'attendre à ce que les besoins mondiaux excèdent les capacités de production d'ici quelques décennies ? Ou bien restera-t-elle raisonnablement disponible, sous réserve d'éventuels investissements dans l'exploration et l'extraction ? Ou bien encore la ressource est-elle longtemps abondante et accessible ?

Figure 3: Les 6 dimensions du score de criticité (1 : criticité faible ; 5 : criticité majeure)

Score global de criticité	Réserves disponibles, volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
2,3	3	1	4	3	1	2

A chaque ressource est associé un score global de criticité, déterminé en calculant la moyenne des scores de chacun des critères ci-dessus.

La deuxième dimension de la criticité concerne la concentration du marché, à la fois aux niveaux de l'extraction de la matière première et de sa première transformation. En effet, la disponibilité géologique ne suffit pas. À l'image du pétrole, la ressource peut être aux mains d'un nombre plus ou moins réduit d'acteurs ou de pays. Est-ce le cas et, si oui, dans quelle mesure cela fait-il peser un risque sur l'approvisionnement, voire pourrait-il causer de futurs conflits géopolitiques ou militaires ?

La troisième dimension de la criticité concerne la concurrence, que ce soit vis-à-vis d'autres usages ou d'autres pays. En effet, les ressources en question sont non seulement convoitées pour la décarbonation et par la France, mais elles peuvent être aussi fortement demandées pour d'autres besoins (informatique, télécom, industrie, transport, agro-alimentaire...) et par d'autres pays, fussent-ils partenaires.

La capacité d'une ressource à être aisément substituable ou recyclable constitue les quatrième et cinquième critères de criticité. Plus on aura d'alternatives ou de possibilités de réemploi, moins on aura à se soucier des éventuelles difficultés d'approvisionnement.

Enfin, la sixième et dernière dimension concerne les problèmes environnementaux et sociétaux que peuvent éventuellement poser l'extraction et l'exploitation de la ressource, à l'étranger ou en France, et qui, dans certains cas, peuvent aller jusqu'à rendre inacceptables certaines filières d'approvisionnement.

Pour chaque ressource, on attribuera une note de 1 (aucune criticité) à 5 (criticité majeure) à chacun de ces critères, ce qui permettra, par simple moyenne arithmétique, d'établir un score de criticité global.

Figure 4: Critères d'évaluation pour l'établissement des scores de criticité

Score	Criticité	Rareté géologique	Concentration des acteurs				Concurrence d'usages et de pays acheteurs	Sociétal et environnemental
		Ratio réserves/ production	Extraction		Première transformation			
			TOP1	TOP3	TOP1	TOP3		
5	Majeure	<25 ans	>60%	<80%	>60%	<80%	Majeure (yc usages militaires)	Morts / Dégâts irréversibles
4	Forte	<50 ans	>40%	>60%	>40%	>60%	Forte (yc usages énergie, hightech et télécom)	Atteinte aux droits humains / Dégâts importants à grande échelle
3	Moyenne	<100 ans	>20%	>40%	>20%	>40%	Moyenne (autres industries)	Inégalités sociales / Dégâts environnementaux locaux fréquents
2	Mineure	<200 ans	>10%	>20%	>10%	>20%	Mineure	Impacts faibles, localisés, rares
1	Pas de criticité	>200 ans	<10%	<20%	<10%	<20%	Aucune	Aucun

Pour une ressource donnée, le score de criticité prend notamment en compte les critères suivants : rareté géologique, concentration du marché, concurrences d'usages, impacts sociaux et environnementaux de l'extraction et l'exploitation.

On peut, de la même façon, établir un score de criticité pour les quinze domaines de la SNBC en faisant la moyenne des scores des ressources qui les concernent (Figure 4).

Cette échelle de notation de la criticité, de 1 à 5, est lacunaire et en aucun cas linéaire. Par exemple, l'écart que représente le passage d'une criticité « forte » (4) à « majeure » (5) pour une ressource n'est en rien comparable au passage d'une criticité « mineure » (2) à « moyenne » (3), aussi bien du point de vue des réserves de la ressource en question que de la dangerosité pour les êtres vivants et l'environnement.

Pour tenter de remédier à ce problème de représentation et de compréhension de l'échelle, on peut proposer un modèle plus avancé détaillé Figure 5. Cette nouvelle échelle, basée sur une courbe

logarithmique, permet d'étaler de 1 à 100 les scores issus de l'évaluation précédente et d'établir un indice qui rend mieux compte de l'impact réel des scores les plus mauvais.

Un euro qui a peu de conséquences géostratégiques ou environnementales compte pour 1 euro.criticité. Un euro pour une ressource qui aurait un score de 5 sur toutes les dimensions géostratégiques et environnementales compterait pour 100 euros.criticité. En pratique dans cette étude, la ressource la plus critique a un score moyen de 4,2. Un euro dépensé a un impact géostratégique et environnemental de 40 euros.criticité. Les ressources à criticités plus modérées considérées dans cette étude ont un score moyen d'environ 2. Un euro dépensé a un impact géostratégique et environnemental d'environ 3 euros.criticité.

Figure 5: Approche pour la quantification de la criticité : score, indice d'impact, MEC

Criticité quantifiée en :		
SCORE de 1 à 5	C INDICE D'IMPACT de 1 à 100	Millions d'euros.criticité Selon volumes
5 - Majeure	100	Proxy : 2 points de score en plus = 10 fois plus d'impact stratégique ou environnemental Formule exacte $C = 10^{[(Score-1)/2]}$ MEC = Millions d'euros * criticité (C).
4 - Forte	30	
3 - Moyenne	10	
2 - Mineure	3	
1 - Pas de criticité	1	

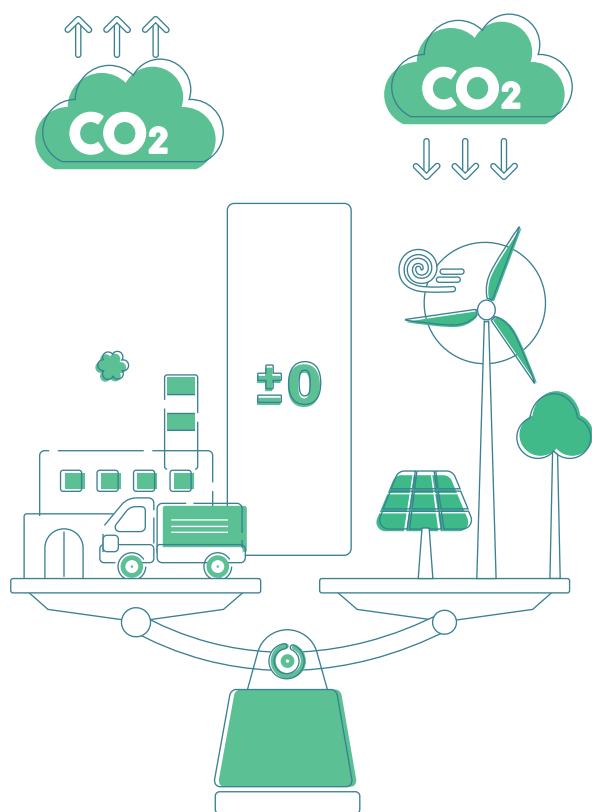
1.2.2 ERRR : un choix sémantique pour faciliter l'analyse quantitative

Historiquement, le modèle économique linéaire consiste à extraire, produire, utiliser et jeter.

Par opposition, l'ADEME définit l'économie circulaire comme « un système économique d'échange et de production visant à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement. » Pour l'ADEME, elle repose sur 7 principes, qualifiés de piliers, répartis en trois familles (Figure 6).

Il existe par ailleurs une multitude de segmentations et de termes pour décrire les leviers d'action de la circularité. Ils sont souvent résumés par des acronymes utilisant la lettre R (3R, 5R, 10R...). Les définitions en sont souvent assez strictes, mais propres à un secteur d'application, et elles ne sont pas toujours cohérentes ou compatibles.

L'objectif premier de cette étude étant de proposer une approche quantitative simple, nous avons opté pour un choix sémantique (présenté Figure 6.) en correspondance avec les sept piliers de l'ADEME. Les termes que nous avons retenus – Éviter, Réduire, Réemployer, Recycler (ERRR) – constituent un compromis entre de nombreuses définitions. Réemployer, en particulier, est utilisé au sens de l'anglais « reuse » tel que défini dans la directive n° 98/2008 CE du 19 novembre 2008².



² Dans la présente étude, le flux physique Réemployer est distingué du flux Recycler par le fait qu'il traite de la réutilisation de composants complets du produit – ou du produit entier – sans changement de destination d'usage, en restant fidèle au sens du mot anglais « Reuse » de la directive européenne n° 98/2008 CE du 19 novembre 2008, traduit dans le texte français de la directive par le mot « Réemployer ». Les mots réutiliser/réutilisation n'ont pas été mis en avant par souci de clarté, pour éviter des questions juridiques et techniques qui peuvent introduire des confusions entre « Réemployer » et « Recycler ». En particulier, ce rapport ne traite pas de la question du sous-produit (dont la réutilisation est certaine) et de la procédure de sortie du statut de déchet. Dans ce cas, le mot « réutiliser » introduit une zone grise au sein de Recycler. En effet, le mot « réutilisation » s'applique alors physiquement aux déchets du flux Recycler, avec changement de statut juridique de déchet à la « réutilisation incertaine » vers produit à la « réutilisation » souhaitée et monétisée, la plupart du temps avec changement de destination d'usage.

Figure 6: Les leviers ERRR de l'étude et leur correspondance avec les 7 piliers de l'ADEME

7 PILIERS DE L'ADEME	LEVIERS SIMPLIFIÉS UTILISÉS DANS LA MODÉLISATION ET LE RAPPORT
Économie de la fonctionnalité	% ÉVITER ■ Éviter par des choix stratégiques ■ Substituer entre solutions pour diversifier la pression sur les ressources critiques ■ Orienter le modèle d'affaire vers l'économie partagée et de fonctionnalité ■ Accompagner les clients et les entreprises dans la réduction de leurs besoins
Consommation responsable	
Allongement de la durée d'usage	% RÉDUIRE ■ Réduire par les choix techniques en bureau d'études ■ Réduire le contenu en matière dans les produits ■ Réduire les pertes de matière dans les processus de fabrication ■ Utiliser des produits biosourcés ou régénératifs ■ Augmenter la durée de vie du produit, le maintenir, le réparer
	% RÉEMPLOYER (« REUSE ») ■ Réemployer des composants et parties du produit (pas de passage par le statut déchet), ou le produit entier en seconde vie ■ Comme pièces de rechanges pour les réparations ■ Comme composants de produits complets remanufacturés ■ Comme composants dans des produits nouveaux
Recyclage	% RECYCLER ■ Recycler les matières de fin de vie (passage par le statut de déchets) avec une qualité suffisante pour produire une matière fonctionnelle réutilisable dans les produits neufs ■ Recycler les espaces et écosystèmes en les régénérant (ex : mines, décharges)
Écoconception	LEVIERS TRANSVERSES ■ Écoconception stratégique, fonctionnelle et technique ■ Organisation verticale et territoriale ■ Recherche, innovation, formation ■ Digital ■ Règlementaire, incitations, tarifs, marchés publics
Écologie industrielle et territoriale	
Extraction, Exploitation et Achats durables	LEVIERS AMONT / AVAL ■ Investir dans les industries d'exploration, extraction et transformation ■ Prévenir par la géopolitique des ressources, de l'environnement et des déchets

L'approche distingue les leviers circulaires opérationnels (éviter, réduire, réemployer et recycler) des leviers génériques (transverses, amont et aval). Les sept piliers de l'ADEME sont couverts par cette sémantique simplifiée pour les besoins de la modélisation.

De notre capacité collective à actionner ces leviers dépendront les futurs besoins en ressources critiques des différents domaines de la SNBC. C'est pourquoi nous avons établi deux scénarios, l'un à faible circularité (Scénario A), l'autre à circularité renforcée (Scénario B), que nous détaillons paragraphe 1.3. Pour l'un et l'autre, nous avons estimé l'impact qu'auraient les quatre leviers sur chacune des ressources considérées. Exprimées en pourcentage (%), ces hypothèses pondèrent les besoins futurs par rapport à une situation « business as usual ». Elles sont présentées en détail dans l'annexe I des compléments méthodologiques.

Les « % Éviter » découlent des différents choix stratégiques du Scénario A (à faible circularité) et du Scénario B (à circularité renforcée). Éviter consiste, par exemple, à réduire de 10 % le parc de véhicules en circulation en recourant davantage au partage de véhicules (économie de fonctionnalité, plateformes), aux modes de transports légers (vélos à assistance électrique) et aux transports en commun.

Les « % Réduire » traduisent les gains de matière qui peuvent être obtenus grâce à la conception et aux choix technologiques en bureau d'étude. Ces progrès potentiels sont en général limités, surtout sur les technologies matures. Par ailleurs, la tendance à toujours rechercher davantage de performance s'accompagne souvent d'une utilisation accrue de ressources critiques. Au total, nous avons supposé une stabilisation avec des gains nuls d'ici 2050 dans le Scénario A et des gains de 5 % ou 10 % selon les domaines dans le cadre du Scénario B. Celui-ci envisage des pourcentages de réduction plus élevés pour les technologies qui présentent un potentiel de rupture comme le solaire photovoltaïque ou les batteries.

Les hypothèses de « % Recycler » pour la situation actuelle ont été établies en ordre de grandeur à

partir de la littérature et de quelques entretiens.

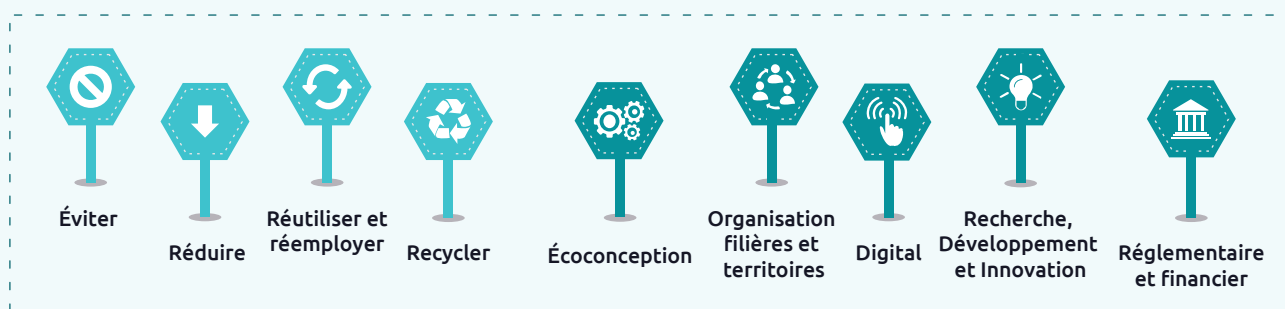
Les « % Réemployer » sont en général faibles ou nuls actuellement. Dans le Scénario A, on a supposé que les progrès, malgré les injonctions de la législation, restaient mesurés avec un gain de seulement 15 % d'ici 2050 par rapport à la situation actuelle. Au contraire, dans le Scénario B, la somme des « % Recycler » et « % Réemployer » croît généralement de 50% avec une limitation à 90 % des flux de fins de vie. En outre, en fonction des ressources, un pourcentage de pertes au cours du processus de recyclage, conduisant à une quantité de matière fonctionnelle, a pu être appliqué. Enfin, concernant le béton, les taux ont été limités de façon à ne pas dépasser un taux d'incorporation au béton neuf de 30 % actuellement et augmentés de façon linéaire jusqu'à 50% en 2050.

Le réemploi est souhaitable ; il n'en constitue pas moins un défi technique, organisationnel et marketing important, même dans les industries B2B de la transition énergétique. Dans le Scénario B, selon les cas, il a été évalué à 0 %, 20 %, ou même plus en 2050, comme pour le réemploi des fondations d'éoliennes.

1.2.3 Les leviers transverses de la transformation circulaire

Aux quatre leviers quantitatifs de la transformation circulaire s'ajoutent cinq leviers transverses : écoconception, digital, R&D et innovation, organisation territoriale des filières, aspects réglementaires et financiers (Figure 6). Quel que soit le domaine, ces leviers seront mis en œuvre pour accomplir les transformations nécessaires à la diffusion et à l'approfondissement de l'économie circulaire. La partie III de ce rapport les présente en détail.

Figure 7: Les 4 leviers ERRR de la transformation circulaire seront mis en œuvre grâce à 5 leviers transverses



1.2.4 La quantification des flux bruts, nets et circulaires

Pour la dimension quantitative, on distingue des flux bruts, des flux nets, et des flux circulaires. Les premiers correspondent aux besoins totaux de matières pour construire les équipements, ou aux matières totales brutes à considérer au moment de la fin de vie. Les flux circulaires correspondent aux flux de recyclage et de réemploi qui exploitent les gisements de fins de vie afin de réinjecter des matières fonctionnelles de qualité, des pièces, des composants ou des produits entiers dans le cycle de production/utilisation. Par différence, on obtient les flux nets à fournir par l'économie linéaire et les importations. Ces trois types de flux sont quantifiés en volumes (tonnes), en valeur (euros) et en millions d'euros.criticité (MEC).

Les évaluations en volumes se fondent sur des ratios issus de l'étude SURFER³, du feuilleton Transition(s) 2050 de l'ADEME dédié aux ressources⁴, de chiffres tirés de l'étude de l'AIE⁵ et d'évaluations propres à Capgemini lorsqu'aucune source n'était disponible. Ces ratios ont été considérés constants entre 2020 et 2050. Une seconde approximation tient au fait que nous avons utilisé les mêmes ratios pour les flux de fins de vie (déconstructions).

Les évaluations des ressources minérales en valeur sont fondées sur les prix moyens des commodités du London Metal Exchange (LME). Les terres rares, le graphite et le silicium sont évalués selon les prix tirés du rapport européen [EU 2020a] et le cours du béton provient de sites de construction spécialisés.

Une moyenne a été opérée sur quatre périodes : avant 2019, 2019, Covid 2020, Post Covid 2021 pour tempérer les dernières périodes agitées à la baisse comme à la hausse (cf. Figure 8.).

Les métaux et minéraux, hormis l'acier et l'aluminium, sont supposés être entièrement produits à l'étranger. Dans le modèle, l'acier et l'aluminium sont traités de façon spécifique. En effet, ils sont en majeure partie produits en France à partir de minerais importés. Seuls les prix des matières premières importées sont alors pris en compte, à savoir minerais de fer et charbon pour l'acier, alumine et coke pour l'aluminium.

De cette façon, hormis pour le béton, les valeurs en millions d'euros correspondent à la valeur des importations pour toutes les ressources et tous les domaines. La valeur en millions d'euros.criticité (MEC) en est dérivée.



³ [SURFER 2020a] Etude menée par le BRGM pour l'ADEME sur les contenus en matière des technologies de la transition énergétique.

⁴ [ADEME 2022a]

⁵ [AIE 2021a]

Figure 8: Hypothèses de coûts des ressources (évaluation en coûts actuels moyens)

Euros / tonne	Prix utilisés dans la modélisation	10 ans 2012-2019	Min 2020 (Covid)	2021	T1 2022
Période	Moyenne des périodes 1, 2, 3, 4	1	2	3	4
Lithium	22 368	14 474	5 921	16 447	52 632
Cobalt	40 750	26 000	22 000	43 000	72 000
Platinoïdes	45 862 676	37 103 873	40 272 887	51 188 380	54 885 563
Terres Rares	86 957	86 957	86 957	86 957	86 957
Cuivre	6 875	6 500	4 000	8 000	9 000
Graphite	1 272	3 000	696	696	696
Nickel	14 000	13 000	10 000	15 000	18 000
Silicium	2 174	2 174	2 174	2 174	2 174
Aluminium	2 013	1 700	1 300	2 200	2 850
Aluminium (*)	708	732	495	752	852
Acier	833	500	430	1 300	1 100
Acier (*)	170	148	115	214	203
Béton	54	54	54	54	54

(*) Prix des métaux, sauf Aluminium : prix des minerais importés par tonne de métal final (production en France)

Il est important de noter que les flux de fins de vie, les flux de recyclage et les flux de réemplois ont été évalués au prix de leur contenu en ressource neuve (même valeur que précédemment). Cette approximation permet de rapprocher les valeurs brutes, nettes et de flux de recyclage sur un même graphique. Par ailleurs, les différences futures, dans un sens ou dans l'autre, entre les prix des matières neuves et recyclées, ne sont pas connues. Le lecteur pourra corriger les chiffres fournis selon ses convictions et ses propres calculs.

L'évaluation des flux en criticité procède également d'une approche simple et transparente : l'unité

est le million d'euro.criticité (MEC) résultant de la multiplication du prix de chaque ressource par son score de criticité global (cf. Figure 5).

Reflétant la finitude des ressources, leur impact environnemental et social au regard d'éléments financiers, cette évaluation en « euros.criticité » permet également d'observer d'un œil différent les graphiques comparatifs des domaines, des ressources et des scénarios (comme le font des cartes qui représentent les pays non au prorata de leur surface en km², mais d'un autre indicateur comme la population ou le PIB).

1.3 DEUX SCÉNARIOS À CIRCULARITÉ FAIBLE OU RENFORCÉE POUR MATÉRIALISER LES ENJEUX

1.3.1 Rappel des variantes proposées par les scénarios existants

La dernière modélisation officielle de la SNBC2 par la DGECE date de 2020⁶. Elle présente deux variantes, « Gaz bas » et « Gaz haut ». Dans chacune, les niveaux de consommations d'énergie sont identiques pour tous les secteurs, de même que le mix de consommations d'électricité et de vecteurs liquides, solides et hydrogène. La seule différence provient d'un transfert de volumes d'énergies renouvelables thermiques et de récupération (Gaz bas) vers du gaz naturel (Gaz haut), toutes choses restant égales par ailleurs.

Les scénarios de RTE approfondissent la dimension électrique du scénario Gaz bas tant du point de vue des consommations que des productions. Ils proposent six variantes de production, dont une 100 % EnR (M0), deux variantes qui combinent énergies renouvelables (EnR) et nucléaire prolongé sans nouveau nucléaire (M1, M23), et trois variantes de production qui combinent EnR avec une proportion croissante de nouveau nucléaire notées N1, N2 et N03. Les autres formes de consommation et de production d'énergie en dehors de l'électricité ne sont pas abordées.

Les scénarios de Transition(s) 2050 de l'ADEME sont des scénarios de prospective extrêmement fouillés et complets. Ils constituent des pistes de réflexion qui pourraient être utiles pour l'élaboration de la future SNBC3. Ils éclairent différents futurs possibles, contrastés en termes de transformations sociales et techniques mais cohérents dans leur vision. Les scénarios S1 à S4 peuvent être classés de la plus grande à la plus faible sobriété. Les scénarios S1 et S2 sont davantage axés sur la sobriété alors que S3 et S4 mobilisent davantage la technologie pour limiter les impacts environnementaux (via la capture du CO₂, par exemple).

Du point de vue de la production électrique, les scénarios ADEME donnent plus de poids aux énergies renouvelables (EnR) que les scénarios RTE. Le scénario S4 est le plus favorable au nucléaire, équivalent au scénario N1 de RTE.

Enfin, le 10 février 2022, la présidence de la République a annoncé la construction de 6 réacteurs fermes et 8 en option. Cela correspond au scénario N1 de RTE de façon ferme, avec une option sur le scénario N2.

1.3.2 Deux scénarios inspirés du scénario S3 de Transition(s) 2050

Nous avons construit deux scénarios (A et B) pour rendre compte des contraintes de ressources en fonction de leur criticité et de l'apport des principes de l'économie circulaire (cf. Figure 9.).

Ils s'inspirent librement du scénario S3 de Transition(s) 2050, qui présentait plusieurs atouts.

Les scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME, prenant en compte de nombreux aspects de la transition énergétique et écologique, apparaissent comme les plus complets pour notre modélisation, au contraire des scénarios SNBC2 AMS de la DGECE, qui ne bénéficient pas des approfondissements menés depuis 2020 par RTE et l'ADEME, et des scénarios RTE, qui ne constituent une base de réflexion que pour l'électricité.

Parmi les quatre scénarios de Transition(s) 2050, les scénarios S1 et S2 tablent fortement sur la sobriété tandis que le scénario S4 fait quant à lui le pari qu'il ne sera pas nécessaire de maîtriser la demande, la hausse de la consommation étant absorbée par de nouvelles solutions technologiques.

Pour sa part, le scénario S3 comporte une forte proportion de gaz vert et de biomasse. De ce point de vue, il se rapproche du scénario AMS Gaz haut de la SNBC2⁷. Il sert de base à notre Scénario B du point de vue du mix, avec quelques aménagements nécessaires pour la mobilité, le mix électrique, et pour éviter une partie de l'impact inutile de la construction.

Le Scénario A est dit « à circularité faible ou tendancielle ». Du fait d'une plus grande électrification et d'un moindre recours aux biomasses, il n'évite pas le recours aux ressources à haute criticité. La maîtrise de la demande est moins recherchée. Les taux de recyclage et de réemploi progressent sans forcément atteindre les objectifs de la loi. Ils ne sont pas au cœur de la transformation, l'économie reste fortement linéaire. Il correspond à ce qui pourrait se passer si nous ne prêtions pas attention à la question des ressources minérales à forte criticité, avec, dans le même temps, peu d'efforts en matière de sobriété en raison d'une confiance accrue dans l'électrification et les technologies (hydrogène...).

Le Scénario B est dit « à circularité renforcée ». Une stratégie de limitation du recours aux technologies nécessitant les ressources les plus critiques est mise en place, avec un rééquilibrage partiel de l'électrification grâce aux marges de manœuvre qu'offrent un meilleur emploi des biomasses. Les leviers de maîtrise de la demande sont activés plus fortement, non seulement

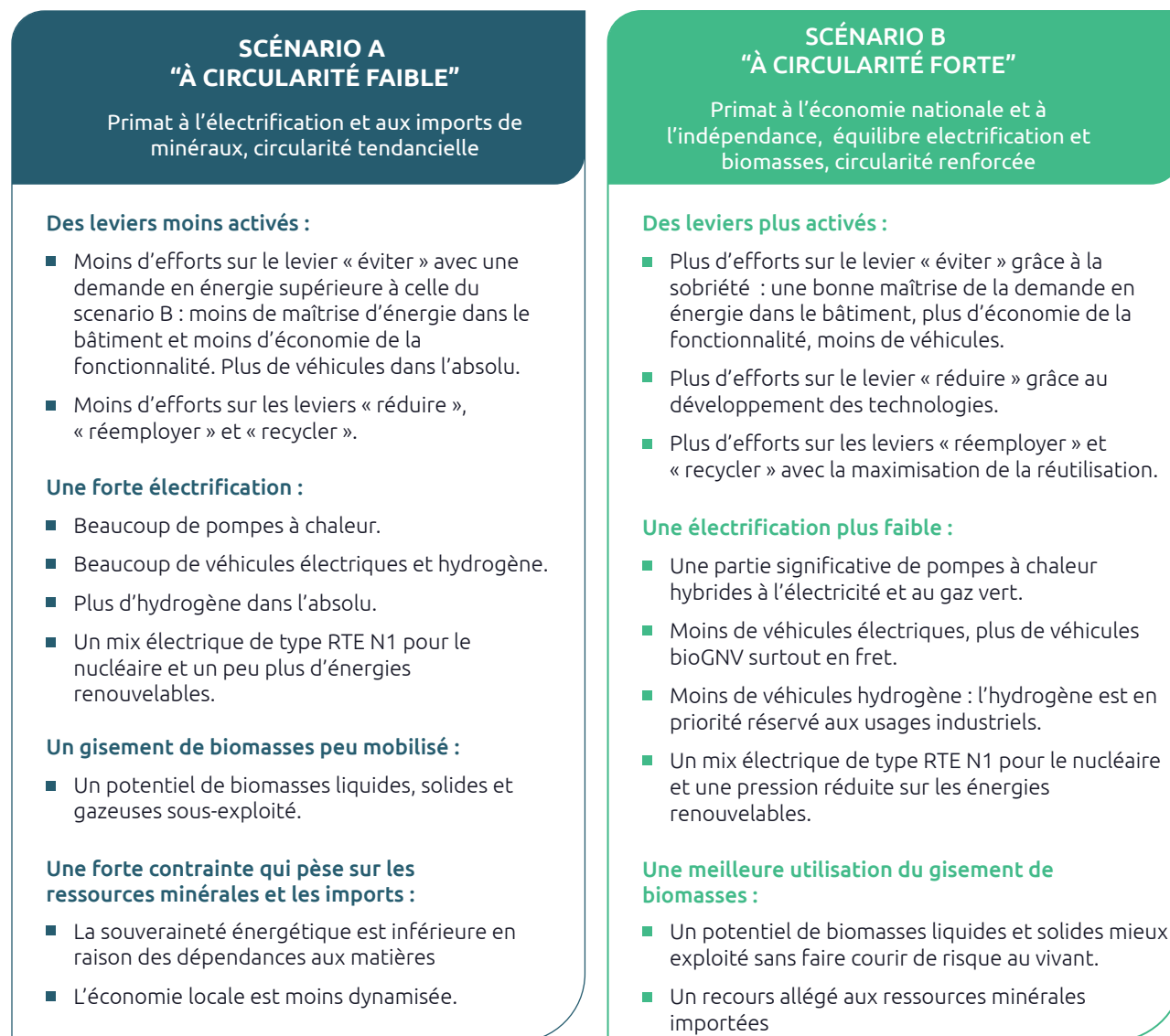
⁶ [DGECE 2020a] Publication en janvier 2020, travaux antérieurs en 2019.

⁷ [MTE 2020a]

pour l'énergie mais aussi pour les ressources, tout particulièrement dans le bâtiment et la mobilité. Les taux de recyclage et de réemploi sont maximisés. Le

Scénario B place la réduction des émissions de gaz à effet de serre et celle des volumes de ressources au cœur de la transformation.

Figure 9: Les grands principes et partis pris des scénarios A et B



Quantitativement, l'objectif est d'avoir une différence d'environ 10 % entre les deux scénarios sur un certain nombre de ratios de demande, et de 10 % à 30 % sur certains aspects du mix. Ces disparités sont suffisantes pour obtenir des écarts significatifs au niveau des résultats (Cf. chapitre 2) tout en étant suffisamment faibles pour ne pas être caricaturales et rester dans les limites des marges de discussion de la prochaine SNBC.

Ces deux scénarios A et B ont vocation à être comparés l'un à l'autre. La modélisation sur lesquels ils reposent

donne des ordres de grandeur utiles sans toutefois prétendre à la précision des scénarios issus de :

- la SNBC2 publiés en janvier 2020 ;
- Futurs Energétiques 2050 publiés en octobre 2021 par RTE ;
- Transition(s) 2050 publiés fin 2021, puis en feuilleton début 2022, par l'ADEME.



2 CIRCULARITÉ ET DÉCARBONATION : LES GRANDS ENSEIGNEMENTS

Cette partie présente les grands enseignements quantitatifs que l'on peut tirer des résultats obtenus par notre approche (méthodologie, hypothèses et scénarios détaillés précédemment). Dans un second temps, nous examinons leurs implications pour chacune de nos trois grandes filières en termes de contrainte de ressources et de leviers de circularité à mettre en œuvre pour les alléger. Pour le confort du lecteur il s'agira ici de synthèses, des fiches consacrées aux différents domaines et ressources étant proposées en annexe II pour plus de détails.

2.1 SOUVERAINETÉ, SOBRIÉTÉ, INDUSTRIALISATION DU RÉEMPLOI : TROIS ENSEIGNEMENTS CLÉS POUR UNE FRANCE BAS CARBONE, CIRCULAIRE ET PLUS RÉSILIENTE

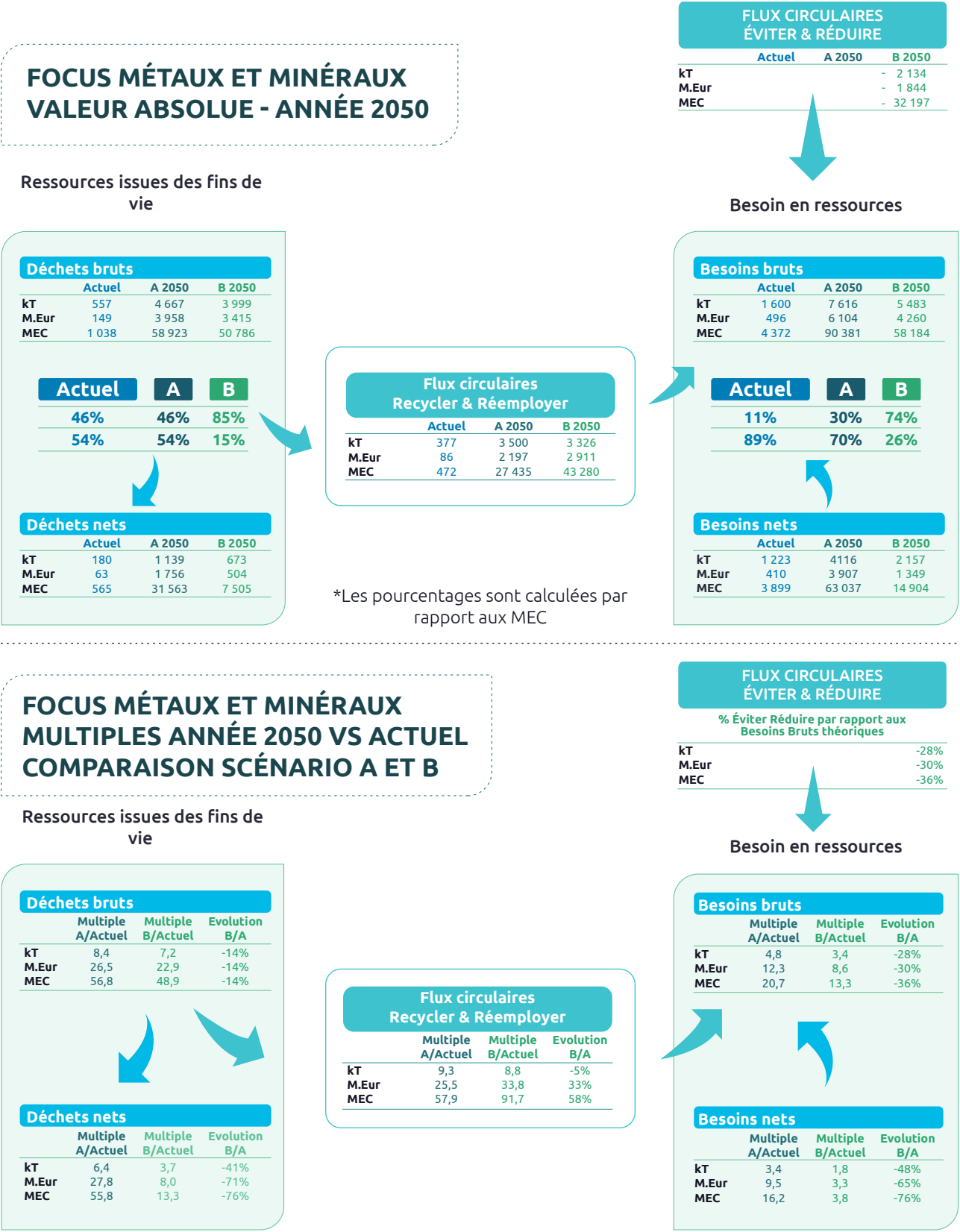
2.1.1 La circularité des ressources, un atout de souveraineté pour une France bas carbone et résiliente

Une circularité forte permettra de renforcer l'indépendance française sur les métaux et minéraux, notamment vis-à-vis de la Chine, de 48 % en tonnage et de 76 % en criticité.

L'étude confirme que la SNBC est particulièrement dépendante de la disponibilité des ressources minérales et métalliques. Les contraintes qui pèsent sur ces ressources pourraient d'autant plus constituer un frein à sa mise en œuvre qu'elles sont davantage nécessaires dans les domaines de haute technologie comme l'électrification et l'hydrogène. Si, comme dans le cas du Scénario A, on n'y prête insuffisamment attention (Figure 10), les importations nettes de métaux et de minéraux sensibles seront multipliées par 3,4 en volume, par 9,5 en valeur, et la criticité nette sera multipliée par 16.

Avec 10 % de sobriété supplémentaire et des efforts marqués de réduction technique, de recyclage et de réemploi, le Scénario B permettrait de diviser par près de deux les tonnages importés, d'en réduire de 65 % la facture et donc notre dépendance économique à des pays comme la Chine, et de baisser de 76% la criticité liée aux métaux et aux minéraux, en particulier du point de vue environnemental.

Figure 10: Principaux impacts des scénarios A (faiblement circulaire) et B (à circularité renforcée) – Focus métaux et minéraux



Mieux valoriser le potentiel français de biomasse et de gaz vert renforce également l'indépendance vis-à-vis des importations de gaz naturel

Le Scénario A n'exploite que 76 % du potentiel de ressources biomasses solides et gazeuses disponibles⁸ contre 96 % dans le Scénario B (Figure 11). Tirer pleinement parti de ces ressources permettra d'accroître la part de gaz verts produits sur le sol français (à condition de commencer suffisamment tôt), et donc de renforcer la résilience et l'indépendance de la France vis-à-vis des importations de gaz naturel, jusqu'à une totale autonomie en 2050. C'est aussi un moyen de réduire d'autant le recours à certaines sources d'énergie très consommatrices de matériaux critiques.

Ces résultats de l'étude montrent qu'une forte circularité inscrite dans les stratégies nationales bas carbone minimise les besoins en ressources provenant, pour la plupart, de pays tiers. C'est donc un levier important de souveraineté et d'indépendance, vis-à-vis des ressources les plus critiques pour l'électrification et concernant l'importation du gaz naturel limitée par la valorisation locale des biomasses gaz naturel. Des choix politiques forts visant à minimiser les besoins amont et à maximiser la circularité auront ainsi, in fine, un réel impact sur la souveraineté française et la sécurisation de ses approvisionnements en ressources critiques.

Figure 11: Le Scénario B présente une meilleure utilisation des ressources biomasse solides et gazeuses disponibles

Scénario A - % D'UTILISATION de l'énergie primaire disponible						
EP disponible, ventilation par catégories de destination	TOTAL	Chaleur & Réseaux de Chaleur	Pyrogazéification	Méthanisation	Gazéification hydrothermale	
2050	TWh PCS	76%	83%	85%	83%	0%
Actuel	TWh PCS	47%	82%	0%	3%	0%

Scénario B - % D'UTILISATION de l'énergie primaire disponible						
EP disponible, ventilation par catégories de destination	TOTAL	Chaleur & Réseaux de Chaleur	Pyrogazéification	Méthanisation	Gazéification hydrothermale	
2050	TWh PCS	96%	88%	99%	100%	99%
Actuel	TWh PCS	47%	82%	0%	3%	0%

⁸ Sources [ADEME 2018a], [ADEME 2020a], modélisation Capgemini Invent.

2.1.2 La sobriété, un levier stratégique pour la résilience économique et la durabilité des écosystèmes naturels

Dans un scénario à forte circularité, les leviers Éviter et Réduire permettent une baisse de 44 % des besoins bruts en ressources

Dans le Scénario A, qui ne prend pas garde aux contraintes de ressources, la mise en œuvre de la SNBC exigera 57 330 kt de matériaux par an en 2050, comparé aux 47 331 kt actuels, soit une augmentation de 21% (Figure 12). Ces besoins bruts ne distinguent pas les ressources provenant de l'extraction (économie linéaire) ou au moins en partie de l'économie circulaire. Ils correspondent aux ingrédients nécessaires à la construction des équipements des quinze domaines considérés (véhicules, centrales de production électriques et biomasse, réseaux, construction neuve et rénovation...).

Si cette augmentation en volume peut paraître modérée pour une période d'une trentaine d'années, les coûts et la criticité connaissent, eux, des hausses beaucoup plus élevées. Dans le Scénario A, le coût de ces ressources sera multiplié par 3,0 par rapport à aujourd'hui, et leur criticité par 8,1 (Figure 12), voire par 20,7 pour les métaux seuls (Figure 10).

Dans le Scénario B, les leviers Éviter et Réduire actionnés par le renforcement de la circularité permettent à eux seuls de baisser de 44 % les tonnages de besoins bruts par rapport au Scénario A. On remarquera également que ces mêmes leviers permettent de diminuer de 14 % les volumes de déchets bruts des domaines concernés de 29 635 kt à 25 421 kt (Figure 12).

Rappelons que, dans notre étude, le levier Réduire concerne les optimisations (conception, choix techniques, innovation...) permettant de diminuer les quantités de ressources entrant dans la fabrication des produits, et le levier Éviter des choix stratégiques visant à se passer de ces produits : choix de pondérer différemment les domaines au sein de la SNBC, choix de modèles d'affaires fondés sur l'économie de la fonctionnalité et le partage des ressources, choix sobres d'équipements recherchant le suffisant et chassant le superflu (« sufficiency » en anglais).

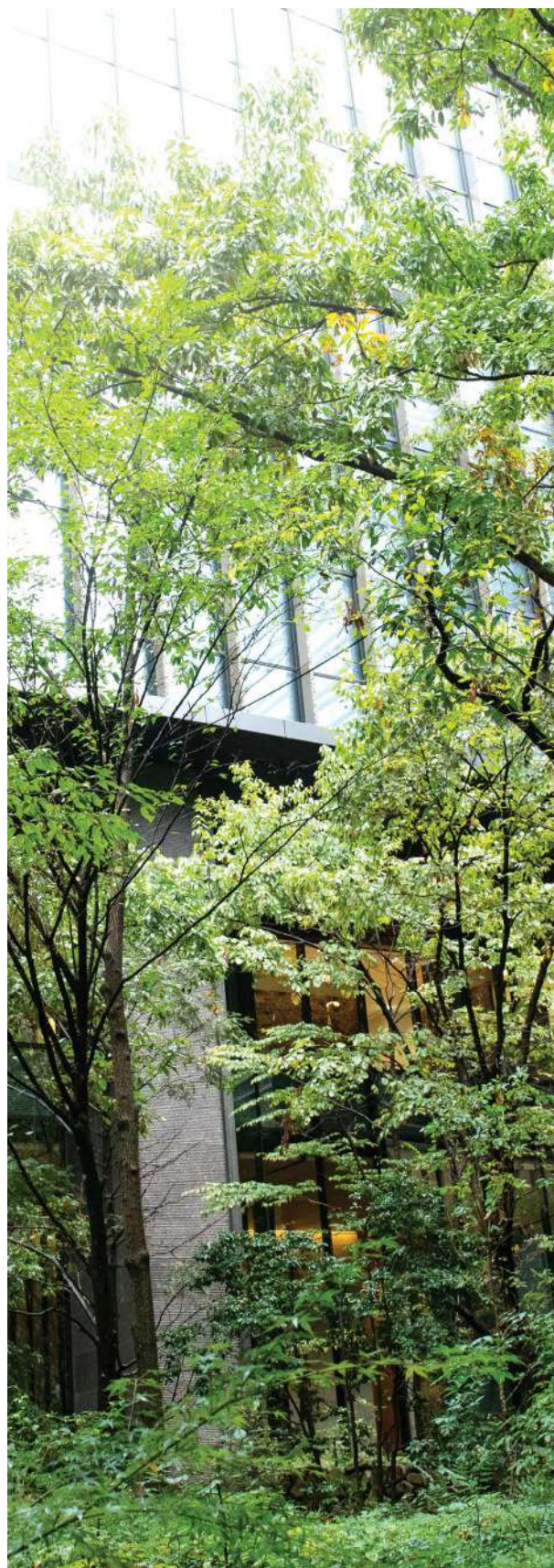
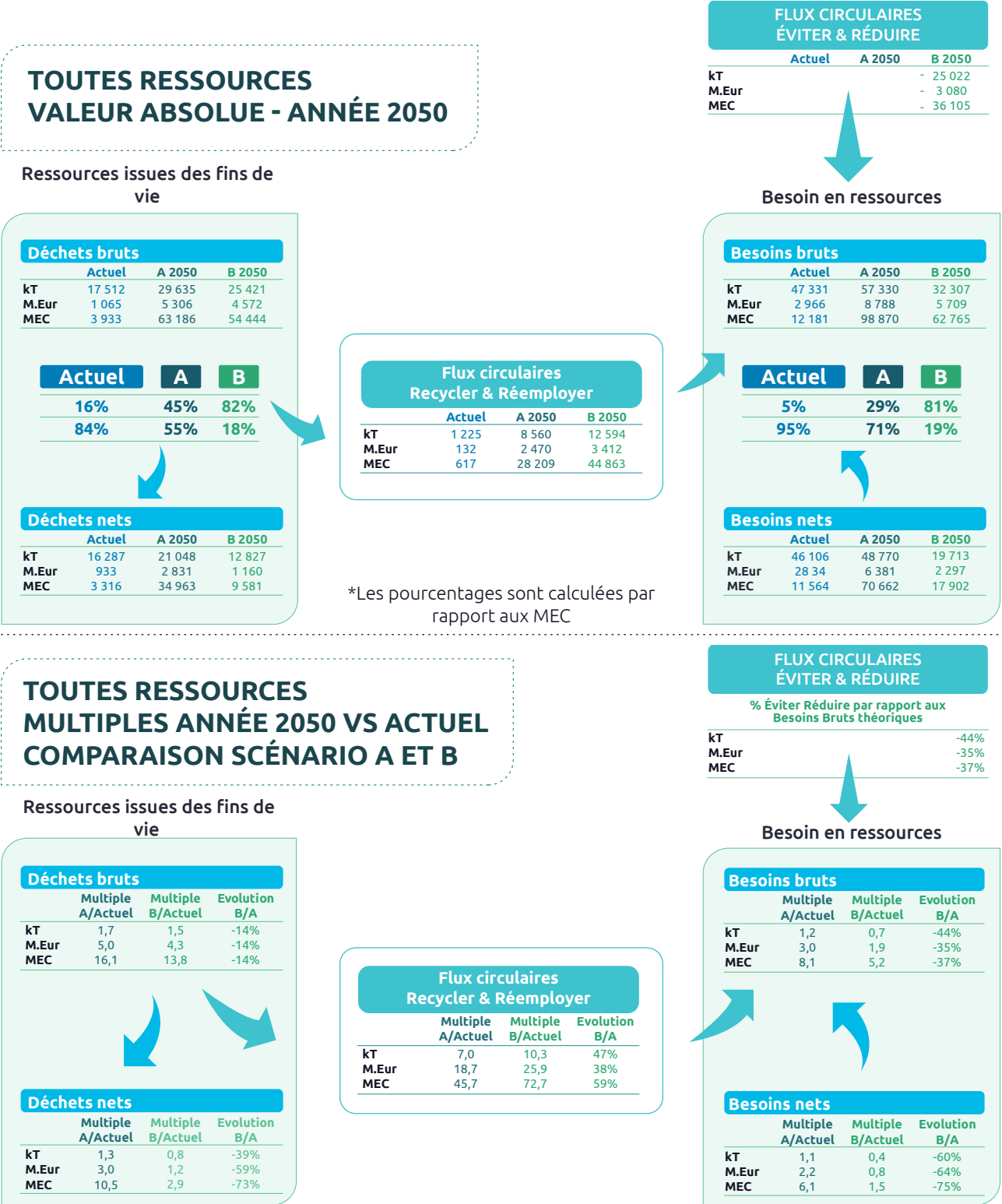


Figure 12: Principaux impacts des scénarios A (faiblement circulaire) et B (à circularité renforcée) - Tous domaines et ressources



Dans l'énergie comme dans l'économie circulaire, la meilleure ressource est celle que l'on évite de consommer. Nos résultats confirment qu'une stratégie visant à limiter les besoins bruts en ressources sera inévitable pour garantir la faisabilité de la transition, la résilience de l'économie et la durabilité des écosystèmes. Dans le Scénario B à circularité renforcée, les leviers Éviter et Réduire entraînent, par rapport au Scénario A, une baisse de près de moitié des besoins bruts en ressources ainsi qu'une diminution de 15 % des déchets de fin de vie. Ceci diminuera d'autant, et de façon salutaire, la pression que font peser les uns et les autres sur les écosystèmes.

2.1.3 La réindustrialisation nationale par le recyclage et le réemploi, source d'importants bénéfices économiques, sociaux et environnementaux

Les deux leviers Recycler et Réemployer peuvent dynamiser la réindustrialisation de la France avec des tonnages jusqu'à 10 fois plus importants d'ici 2050

La Figure 12 montre que le Scénario B à circularité renforcée multiplier les flux industriels de recyclage et de réemploi par 10,3 en tonnage (de 1 225 kt actuellement à 12 594 kt en 2050), par 25,9 en valeur et par 72,7 en criticité évitée grâce à ces processus industriels vertueux.

Cette très forte augmentation pourrait être, pour la France, un axe fort de réindustrialisation car elle consisterait à produire, sur notre territoire, des flux de matière fonctionnelle pour l'industrie et l'économie. Il s'agirait d'une transformation profonde et historique, qui ferait basculer l'industrie française du modèle linéaire traditionnel « extraire-fabriquer-consommer-jeter » vers un modèle circulaire.

L'économie linéaire résiduelle servirait seulement à répondre à la subsistance des besoins nets incompressibles, c'est-à-dire restant à couvrir une fois déduits les flux apportés par le recyclage et le réemploi. Le Scénario B à circularité renforcée diminue l'impact de cette économie linéaire résiduelle de 60 % en volume, 64 % en valeur et 75 % en criticité par rapport au Scénario A.

En renforçant la circularité, la France serait donc capable de mettre en place sa SNBC en ne multipliant la criticité nette que par 1,5 par rapport à 2020 (de 11 564 MEC à 17 902 MEC). En revanche, si les efforts de circularité ne sont pas suffisants, comme dans le Scénario A, mettre en œuvre la SNBC se heurterait à un mur de criticité, avec un coût très lourd 6,1 fois supérieur à ce qu'il est aujourd'hui (70 662 MEC).

Dans le domaine de la construction, une SNBC à circularité forte présente l'occasion historique de baisser les tonnages de déchets et fins de vie, avec une différence du simple au double entre les deux scénarios

Le béton est une ressource majeure puisqu'elle est indispensable à la construction des bâtiments résidentiels et tertiaires, mais aussi au génie civil des équipements des filières bas carbone électrification, hydrogène, chaleur et biomasses.

Le Scénario A prévoit une augmentation des tonnages bruts de béton d'ici à 2050, et des besoins d'élimination des déchets de fins de vie comme d'extraction des sables et granulats nécessaires. Les centres d'enfouissement comme les carrières font peser une pression dans un rayon de 50 km à 100 km autour des grands centres urbains.

Le Scénario B offre l'opportunité historique de faire baisser les tonnages nets de déchets de 25 % (de 16 107 kt actuellement à 12 154 kt) au lieu d'une augmentation de 23 % (19 909 kt) dans le Scénario A. Les tonnages de besoins nets seraient quant à eux réduits de plus de 60 % (17 556 kt pour le Scénario B contre 44 653 pour le Scénario A). Enfin, dans le Scénario B, les flux industriels de recyclage et réemploi de béton seraient supérieurs de 83 % par rapport au Scénario A (Figure 13).

Dans le domaine des biomasses, une SNBC à circularité forte recentre l'activité économique et industrielle sur le territoire

L'exploitation plus intensive (de 76 % à 96 % entre les scénarios A et B) des biomasses permettrait non seulement de diminuer les dépendances extérieures (cf. section 2.1.1), mais aussi de développer une activité économique et industrielle locale en remplacement de l'importation de ressources et d'équipements.

Actuellement, selon le CNI, la filière bois-forêt représente 8,7 % de l'industrie française et 378 000 emplois directs, soit davantage que les filières industrielles du nucléaire et de l'aéronautique, qui comptent respectivement 220 000 et 300 000 emplois, y compris indirects⁹. Renforcer la filière bois-forêt, mais aussi les domaines des gaz verts, permettrait de développer des activités complémentaires et porteuses, au carrefour du vivant et de l'industrie, à la condition toutefois de concilier culture industrielle du 21^e siècle et attention à la biodiversité.

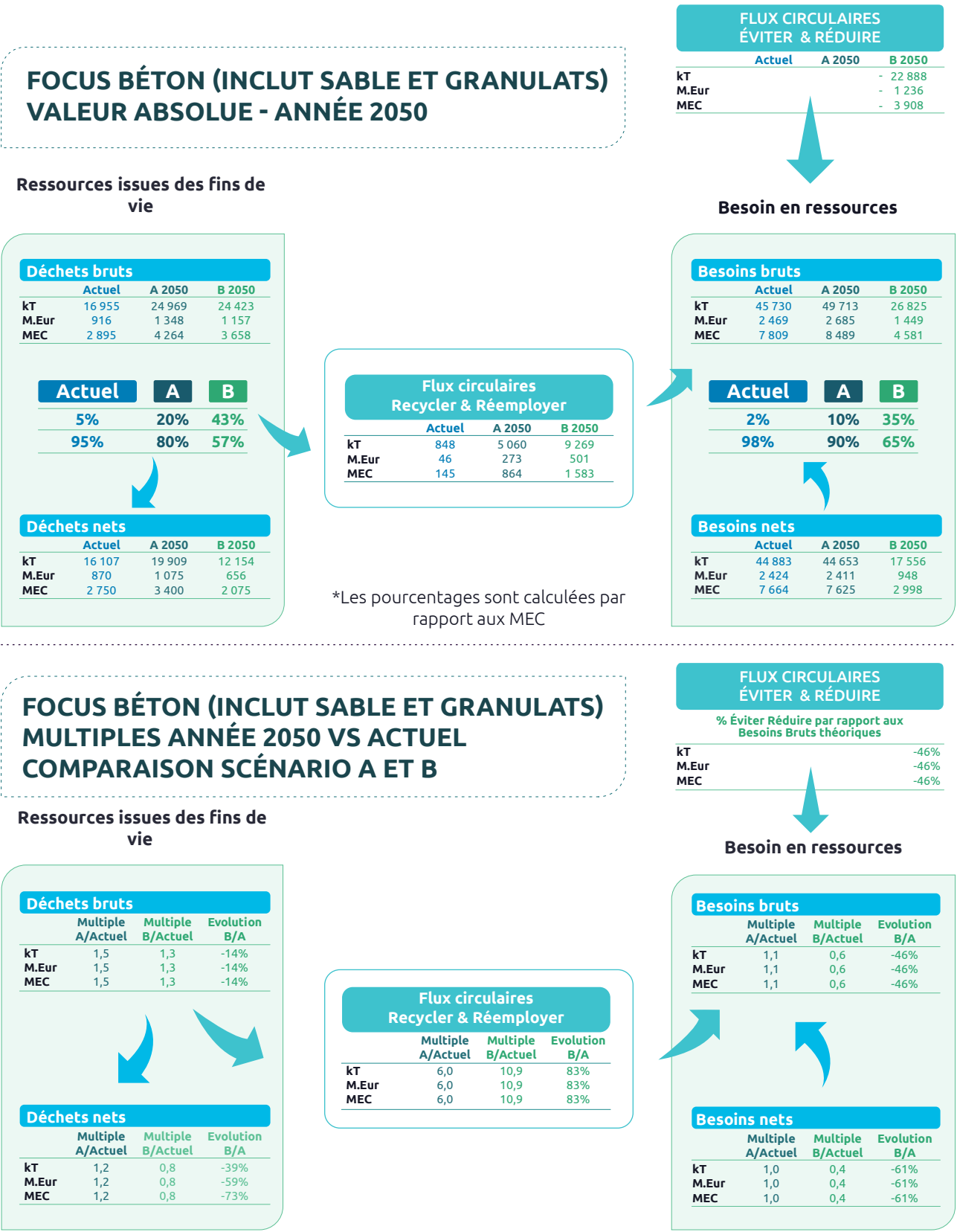
⁹ Source : Veille Économique Mutualisée Filière Bois Forêt

Les domaines du recyclage et du réemploi connaissent des progrès techniques et technologiques spectaculaires, mais ceux-ci ne doivent pas rester confinés à quelques réalisations isolées. Leur industrialisation et leur passage à l'échelle seront déterminants pour permettre demain une véritable circularité des ressources. Dans tous les domaines, et particulièrement en ce qui concerne le béton et la biomasse, le scénario d'une circularité renforcée

montre un potentiel considérable en termes de développement économique local et de réduction des dépendances critiques. Ce potentiel ne pourra se concrétiser que si les filières concernées sont en mesure de gérer des volumes croissants de ressources et de les réinjecter dans l'économie. Des choix stratégiques et technologiques à l'échelle nationale seront nécessaires pour donner les orientations et les marges de manœuvre dont ces filières techniques ont besoin pour se développer.



Figure 13: Principaux impacts des scénarios A faiblement circulaire et B à circularité renforcée – Focus Béton





2.2 CAHIER DES RÉSULTATS QUANTITATIFS

Dans ce cahier des résultats quantitatifs, nous mettons à la disposition et à la réflexion du lecteur quelques données brutes qui nous semblent particulièrement dignes d'intérêt¹⁰ :

- Scores multifactoriels de criticité par ressources et par domaines ;
- Intensité en ressources des différents domaines par unité d'œuvre ;
- Poids des domaines et ressources sur la période 2020-2050
- Comparaison des scénarios A et B.

2.2.1 Scores multifactoriels de criticité

Figure 14: Évaluation du niveau de criticité des ressources

	Ressources													
	Lithium	Cobalt	Platinoïdes	Terres Rares	Cuivre	Graphite	Silicium	Aluminium	Nickel	Acier	Béton	Bois-forêts	Agriculture	Déchets
Réserves disponibles Volumes	4	4	4	1	4	3	1	4	2	1	3	3	3	1
Monopole extraction et transformation	4	5	5	5	3	5	5	2	3	2	2	1	1	2
Réserves stratégique & conflits d'usage	5	4	4	5	4	3	2	3	3	1	1	4	4	2
Substituabilité	4	3	5	3	4	1	3	3	4	4	3	3	3	3
Recyclabilité	3	3	1	4	1	5	4	1	2	1	1	1	1	1
Impacts sociaux et environnementaux	5	5	3	5	5	3	2	4	3	3	2	2	3	2
SCORE moyenne 1-5	4.2	4.0	3.7	3.8	3.5	3.3	2.8	2.8	2.8	2.0	2.0	2.3	2.5	1.8
CRITICITE Impact 1-100	38.3	31.6	21.5	26.1	17.8	14.7	8.3	8.3	8.3	3.2	3.2	4.6	5.6	2.6

La criticité des ressources résulte de la moyenne de six critères (colonne de gauche). Les ressources minérales (avec l'index global le plus élevé) sont les plus critiques, chacune toutefois pour ses propres raisons. De criticité moyenne, les ressources biomasses peuvent en revanche faire face à des conflits d'usages. Les ressources les moins critiques sont le béton et les déchets en tant que ressource.

¹⁰ Des résultats plus détaillés et systématiques sont présentés en annexe III.

Figure 15: Évaluation du niveau de criticité des domaines

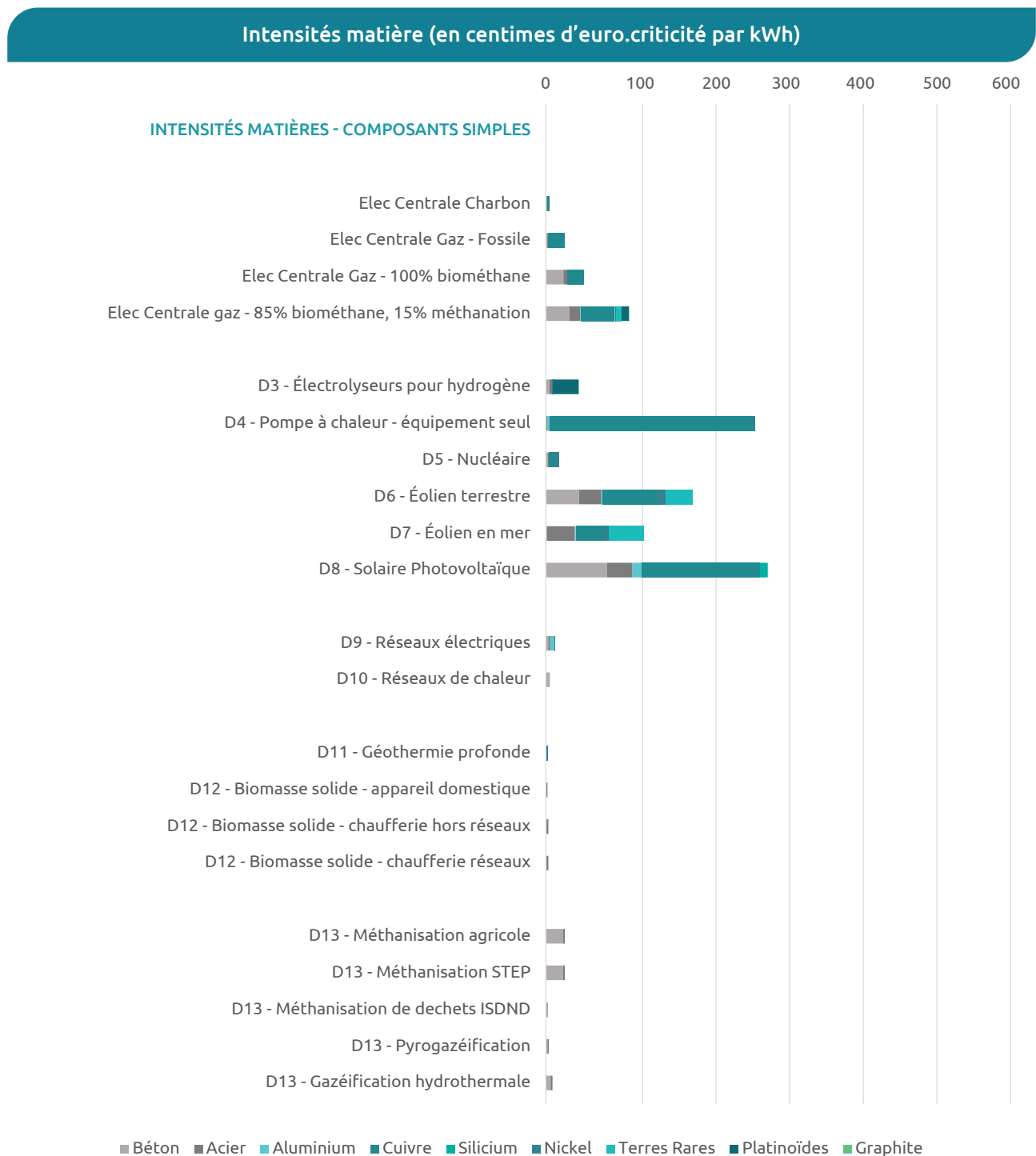
			Ressources													
Filières	Domaines	INDEX Global	Lithium	Cobalt	Platinoides	Terres Rares	Cuivre	Graphite	Silicium	Aluminium	Nickel	Acier	Béton	Bois-forêts	Agriculture	Déchets
Electrification	Véhicules électriques	3.2	4.2	4.0			3.5	3.3		2.8	2.8	2.0				
	Véhicules hydrogène	3.1			3.7	3.8	3.5	3.3		2.8	2.8	2.0				
	Production d'hydrogène par électrolyse	3.1			3.7	3.8	3.5	3.3		2.8	2.8	2.0				
	Pompe à chaleur	2.8					3.5			2.8	2.8	2.0				
	Nucléaire	2.6					3.5				2.8	2.0	2.0			
	Éolien terrestre	2.8				3.8	3.5			2.8	2.8	2.0	2.0			
	Éolien en mer	2.8				3.8	3.5			2.8	2.8	2.0	2.0			
	Solaire photovoltaïque	2.6					3.5		2.8	2.8		2.0	2.0			
	Réseaux électriques	2.6					3.5			2.8		2.0	2.0			
Chaleur et biomasses	Réseaux de chaleur	2.0										2.0	2.0			
	Géothermie profonde	2.3								2.8		2.0	2.0			
	Biomasse solide	2.0										2.0	2.0	2.3		1.8
	Biomasse gazeuse	2.1										2.0	2.0	2.3	2.5	1.8
Construction	Bâtiments - neuf	2.3								2.8		2.0	2.0			
	Bâtiments - rénovation performante	2.3								2.8		2.0	2.0			

Le score de criticité des diverses ressources permet d'établir une moyenne pour chaque domaine. La filière électrification et hydrogène est la filière la plus critique, suivie par celle de la chaleur et des biomasses, puis par la construction.

2.2.2 Intensités par unités d'œuvre – Énergies finales (par kWh)

Pour établir des comparaisons valides entre domaines, on rapporte le besoin de ressources au service rendu final, qu'il s'agisse d'énergie (par kWh produit), de transport (par km parcouru) ou de construction (par m² bâti/rénové).

Figure 16: Intensité en ressources - énergies finales (centimes d'euros.criticité par kWh)



Intensités matière (en centimes d'euro.criticité par kWh)

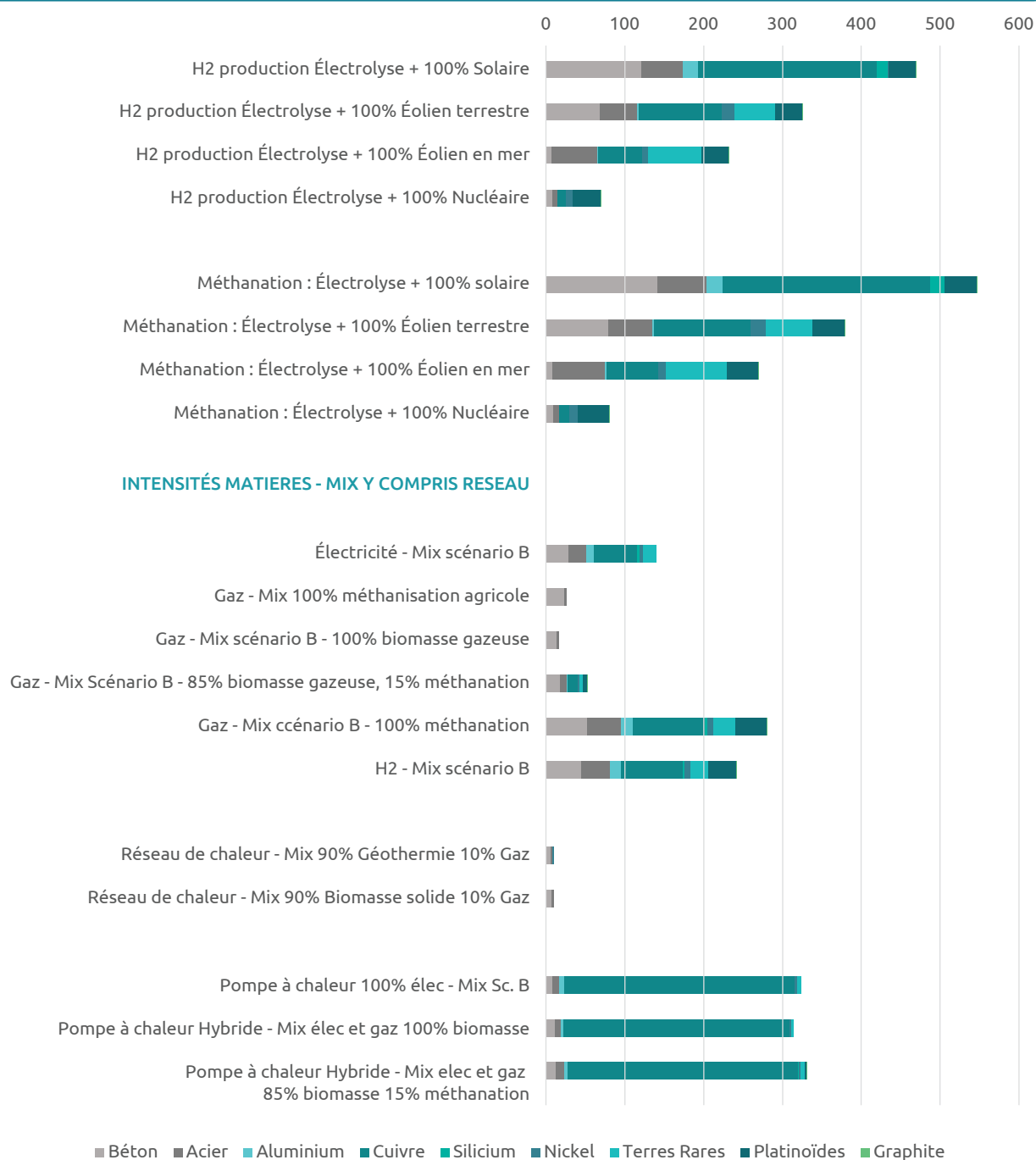
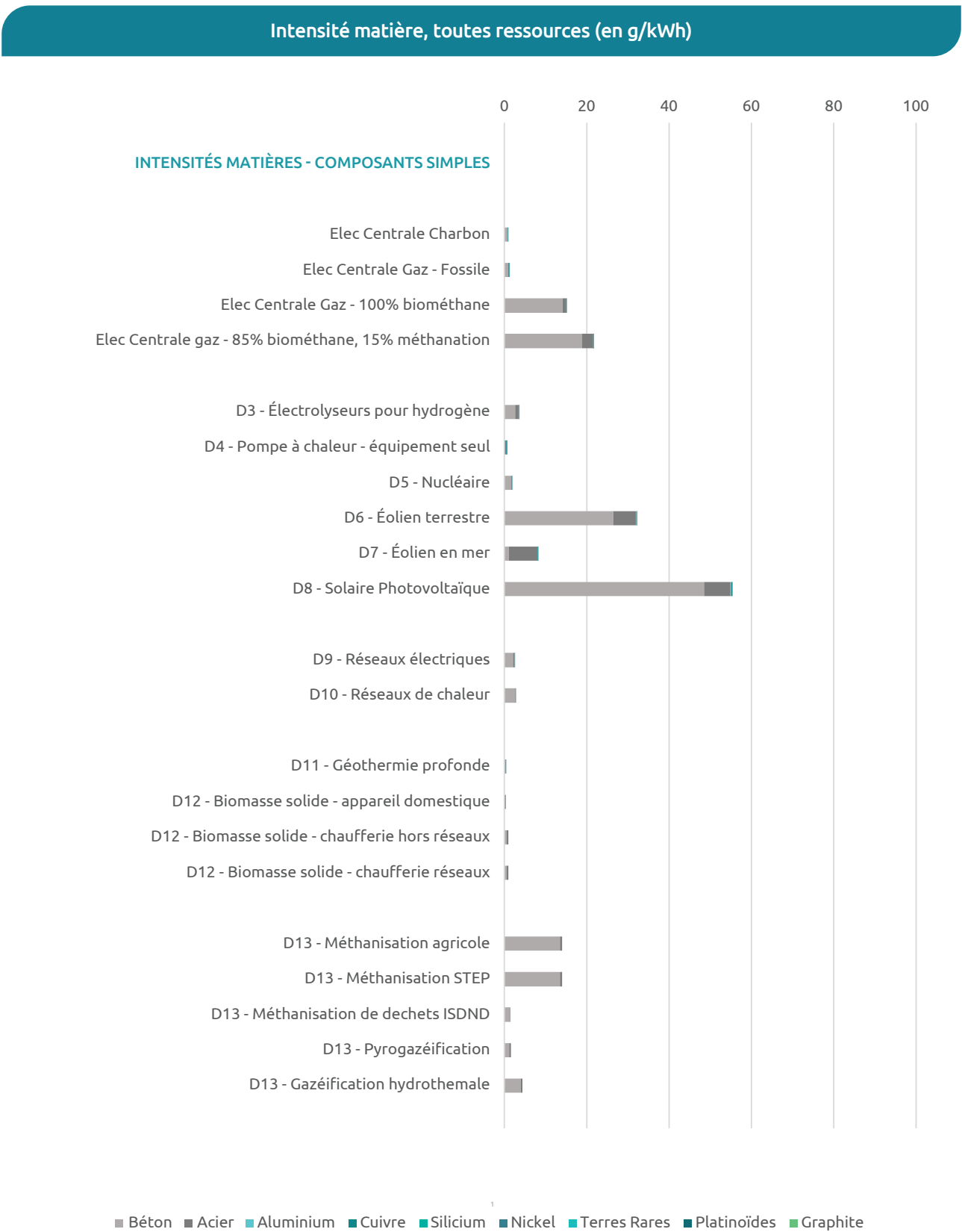
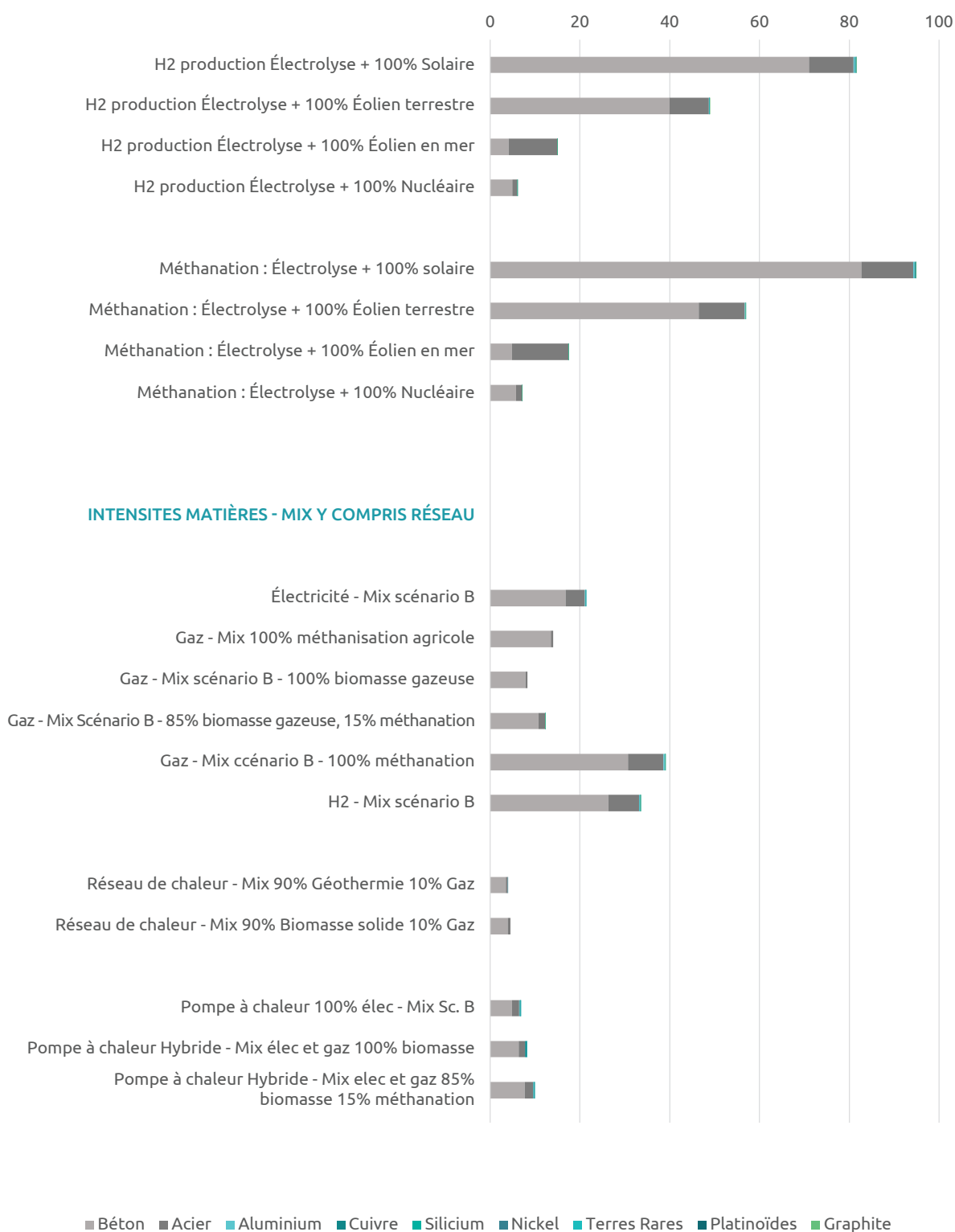


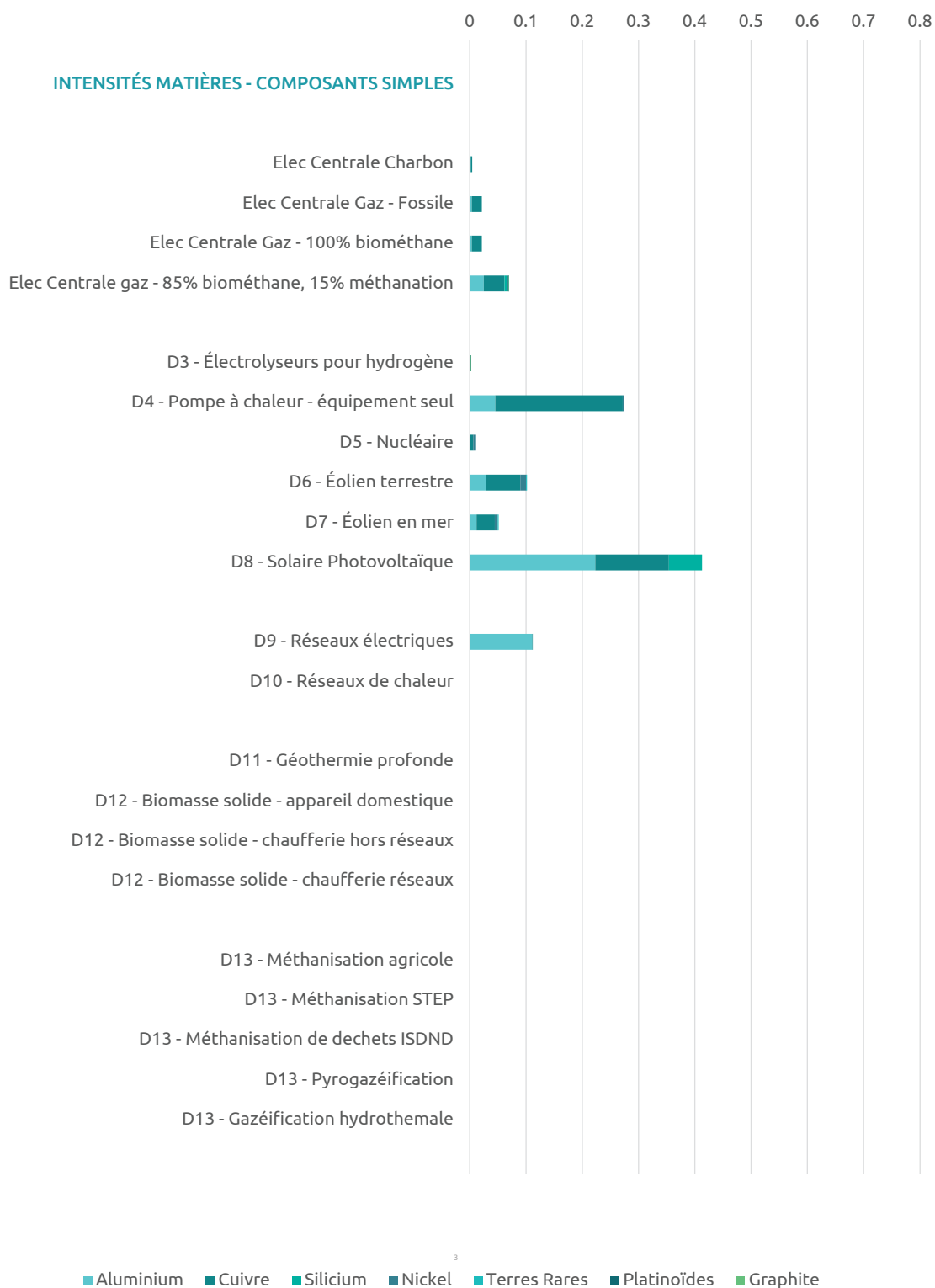
Figure 17: Intensité en ressources - énergies finales (g/kWh)



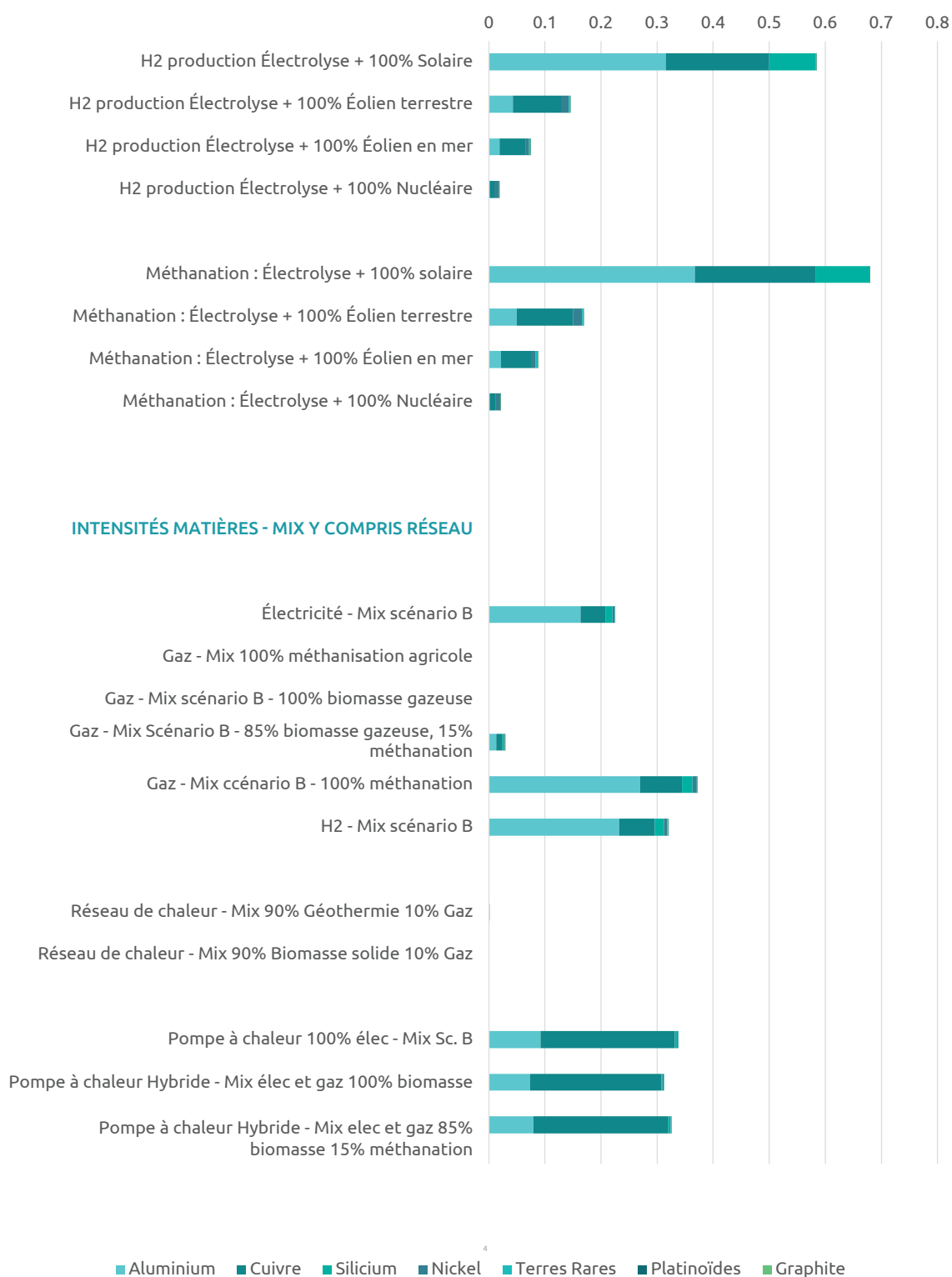
Intensité matière, toutes ressources (en g/kWh)



Intensité métaux et minéraux importés - hors béton et acier (en g/kWh)



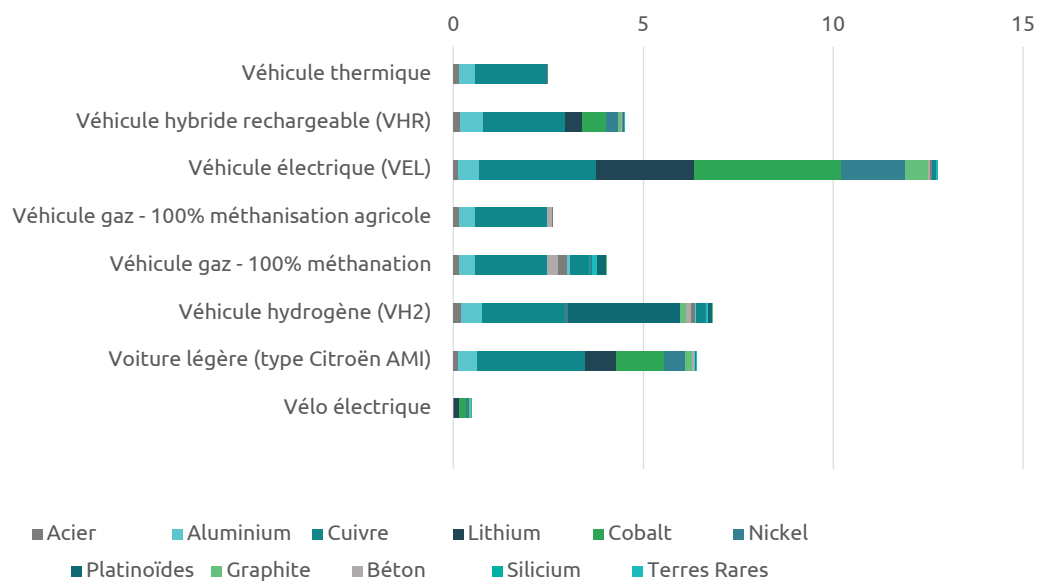
Intensité métaux et minéraux importés - hors béton et acier (en g/kWh)



2.2.3 Intensités par unités d'œuvre – Véhicules (par km)

Figure 18: Intensité en ressources - véhicules (centimes d'euro.criticité/km)

Intensité matière pour les véhicules (en centimes d'euro.criticité/kWh)



Intensité matière pour les véhicules - Fabrication en bleu sombre - Consommation d'énergie en bleu clair (en centimes d'euro.criticité/kWh)

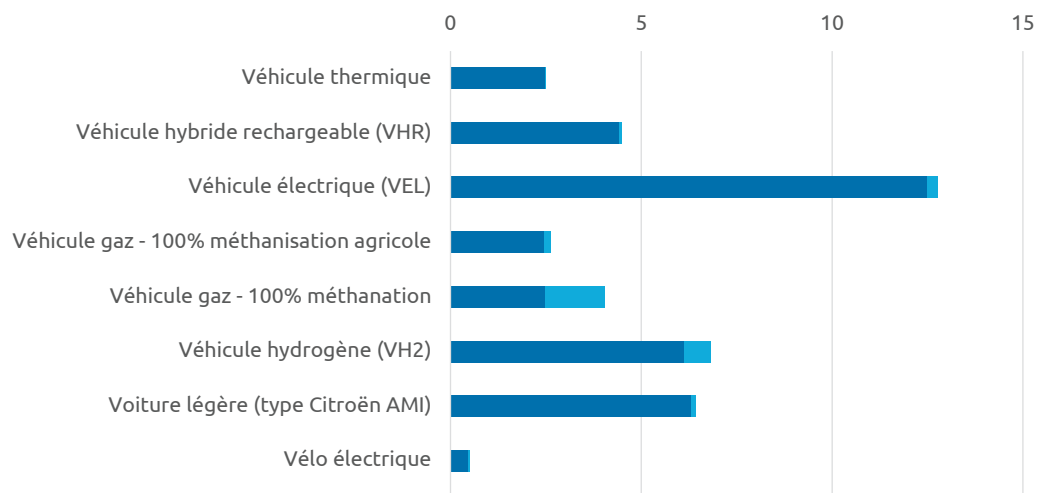
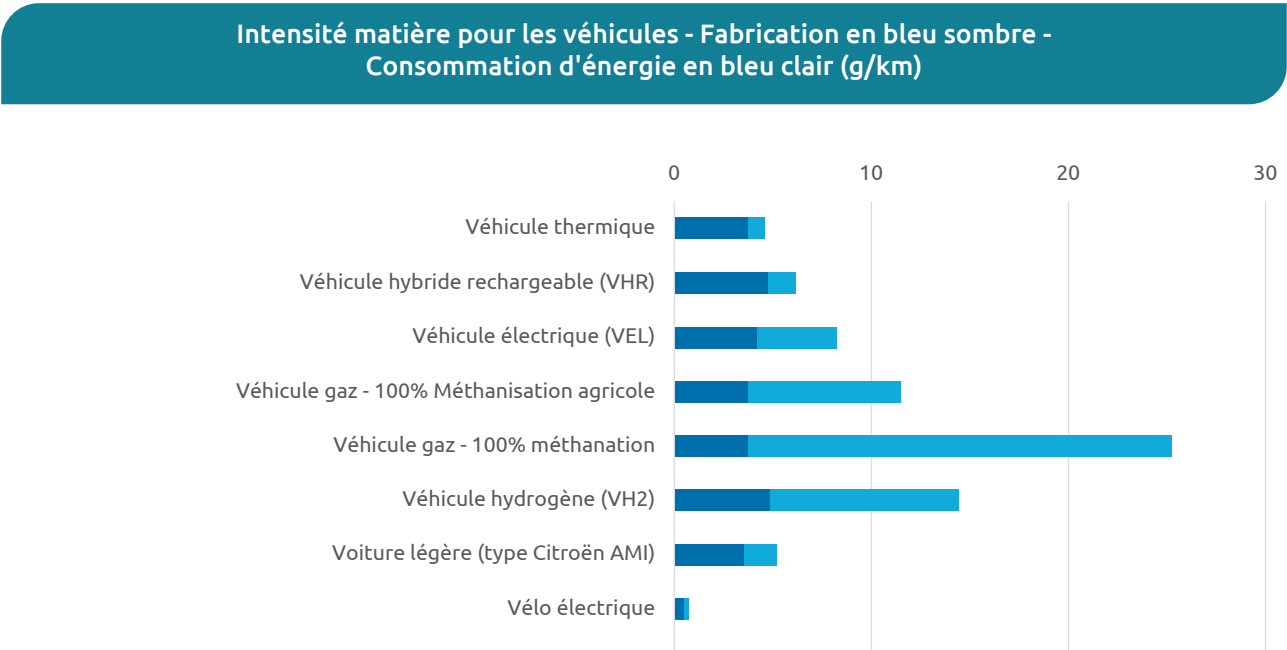
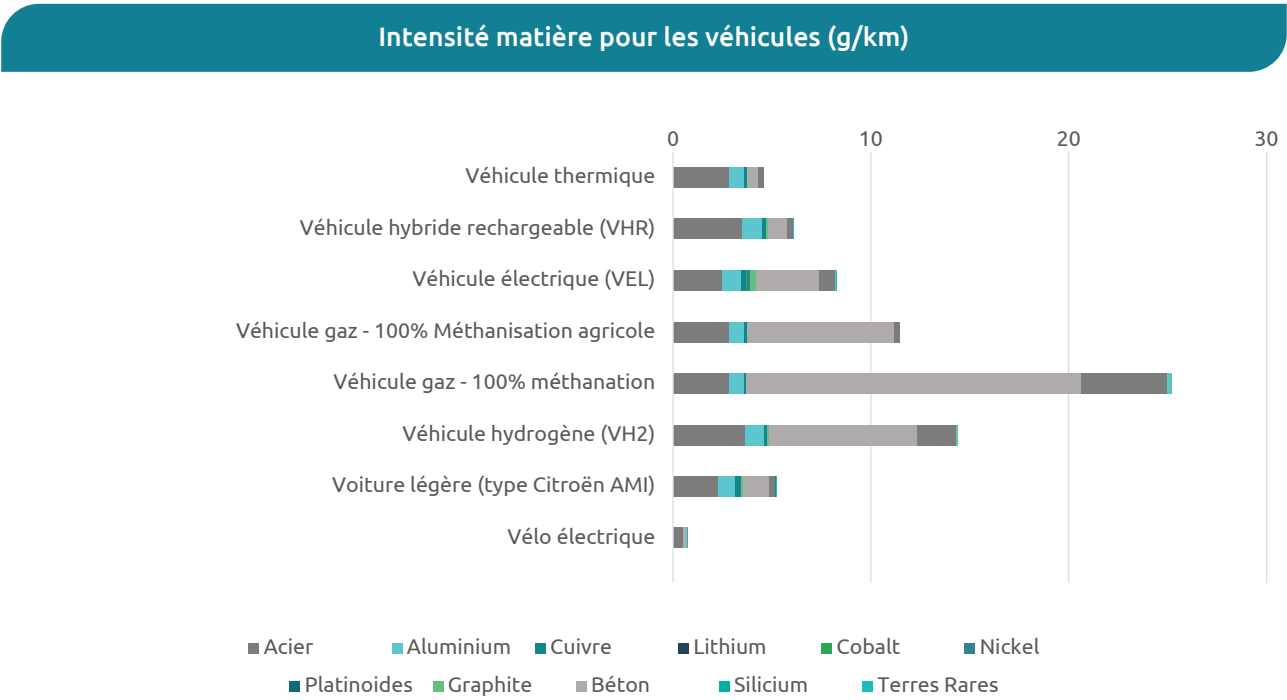


Figure 19: Intensité en ressources - véhicules (g/km)



2.2.4 Intensités par unités d'œuvre – Construction (par m²)

Figure 20: Intensité en ressources - construction (euros.criticité/m²)

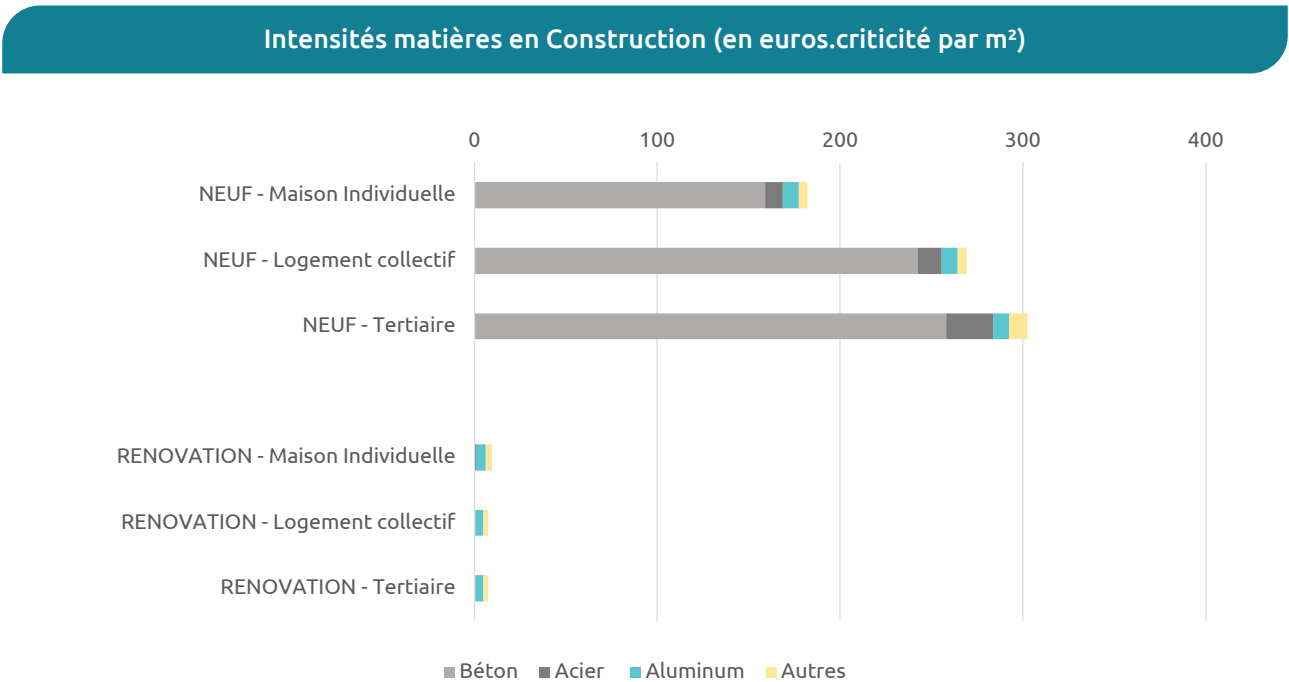
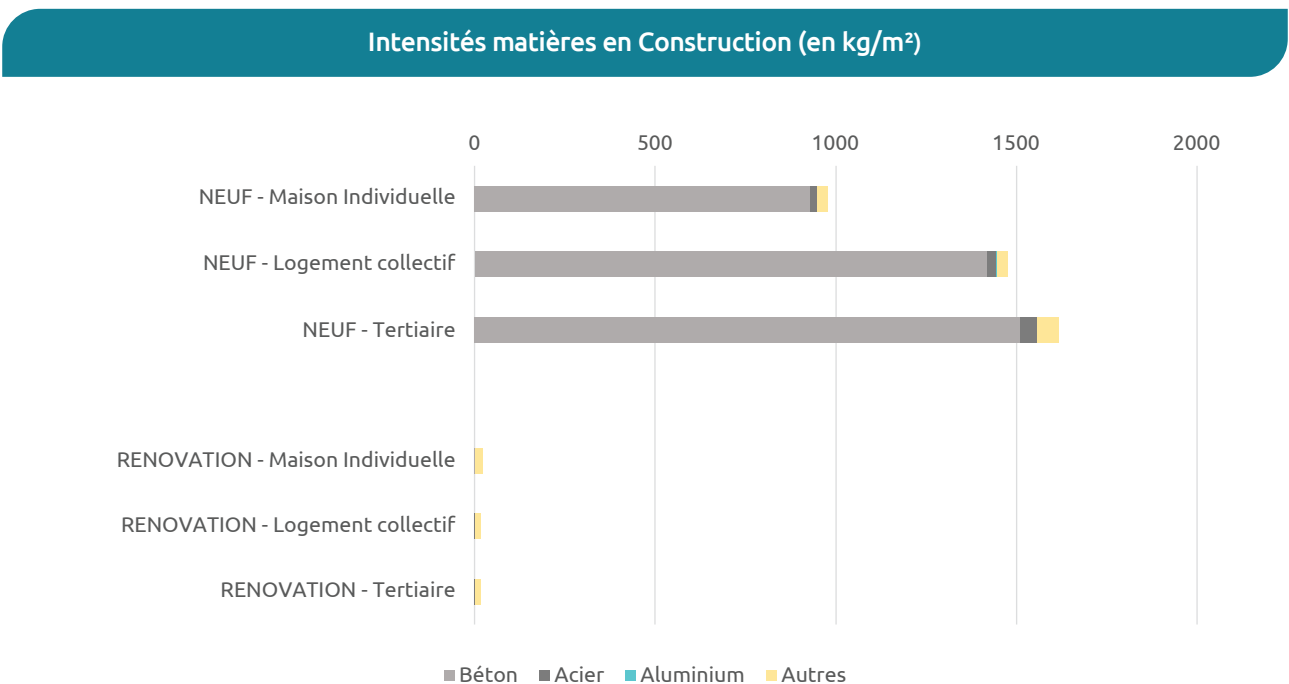
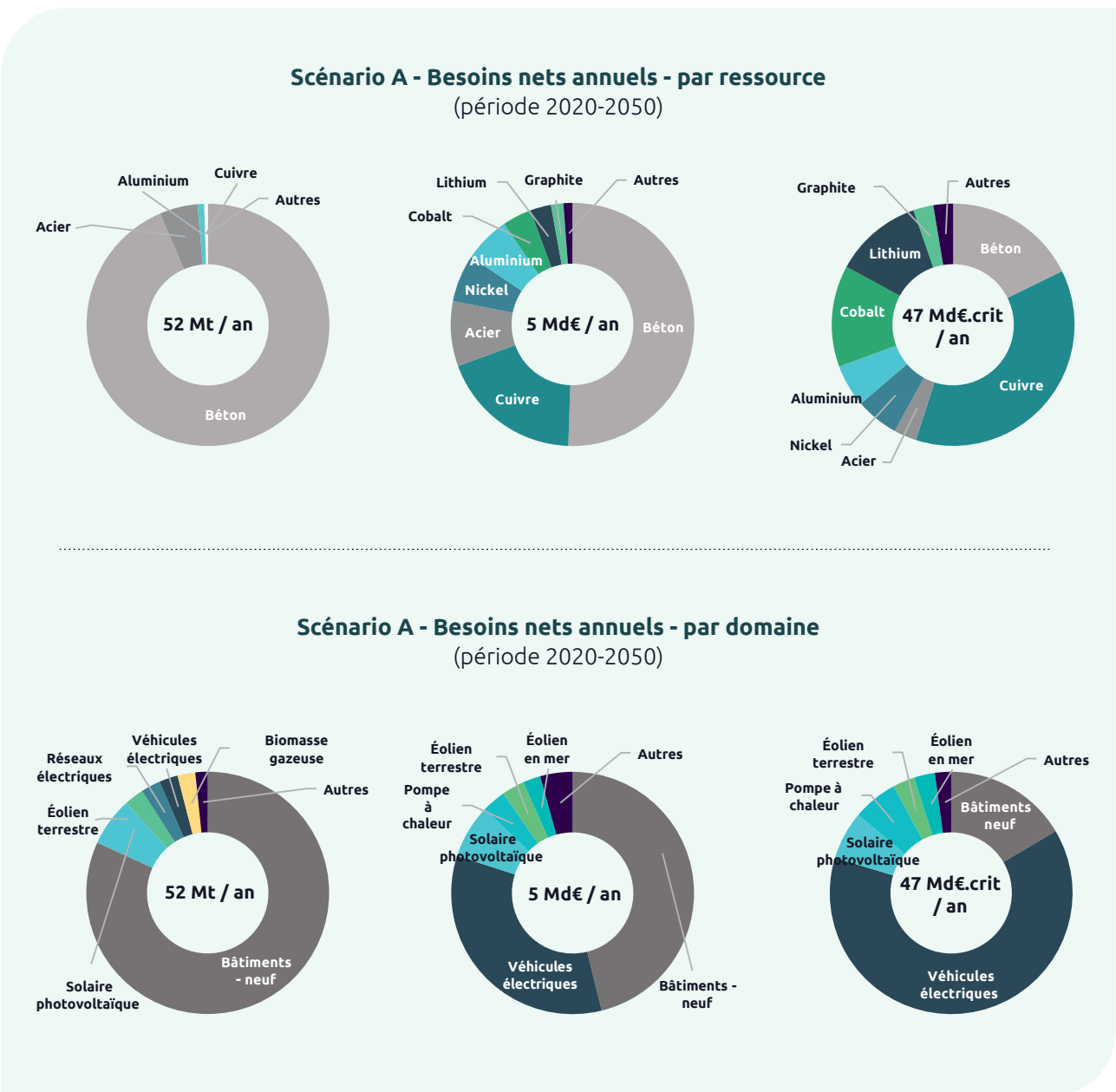


Figure 21: Intensité en ressources - construction (kg/m²)



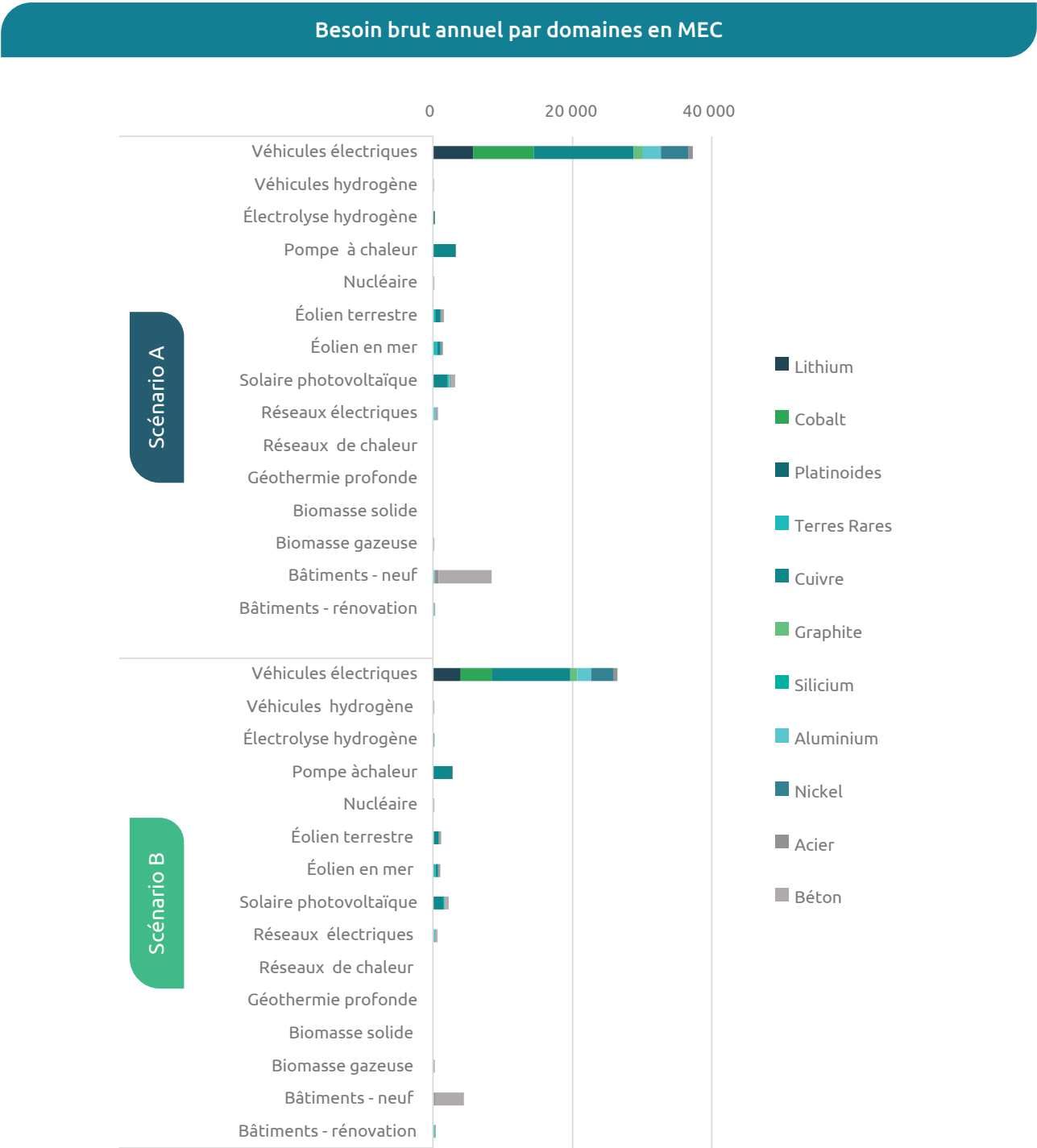
2.2.5 Poids des domaines et ressources

Figure 22: Poids des domaines et ressources (en Mt, milliards d'euros, milliards d'euros.criticité)



2.2.6 Comparaison des scénarios A et B

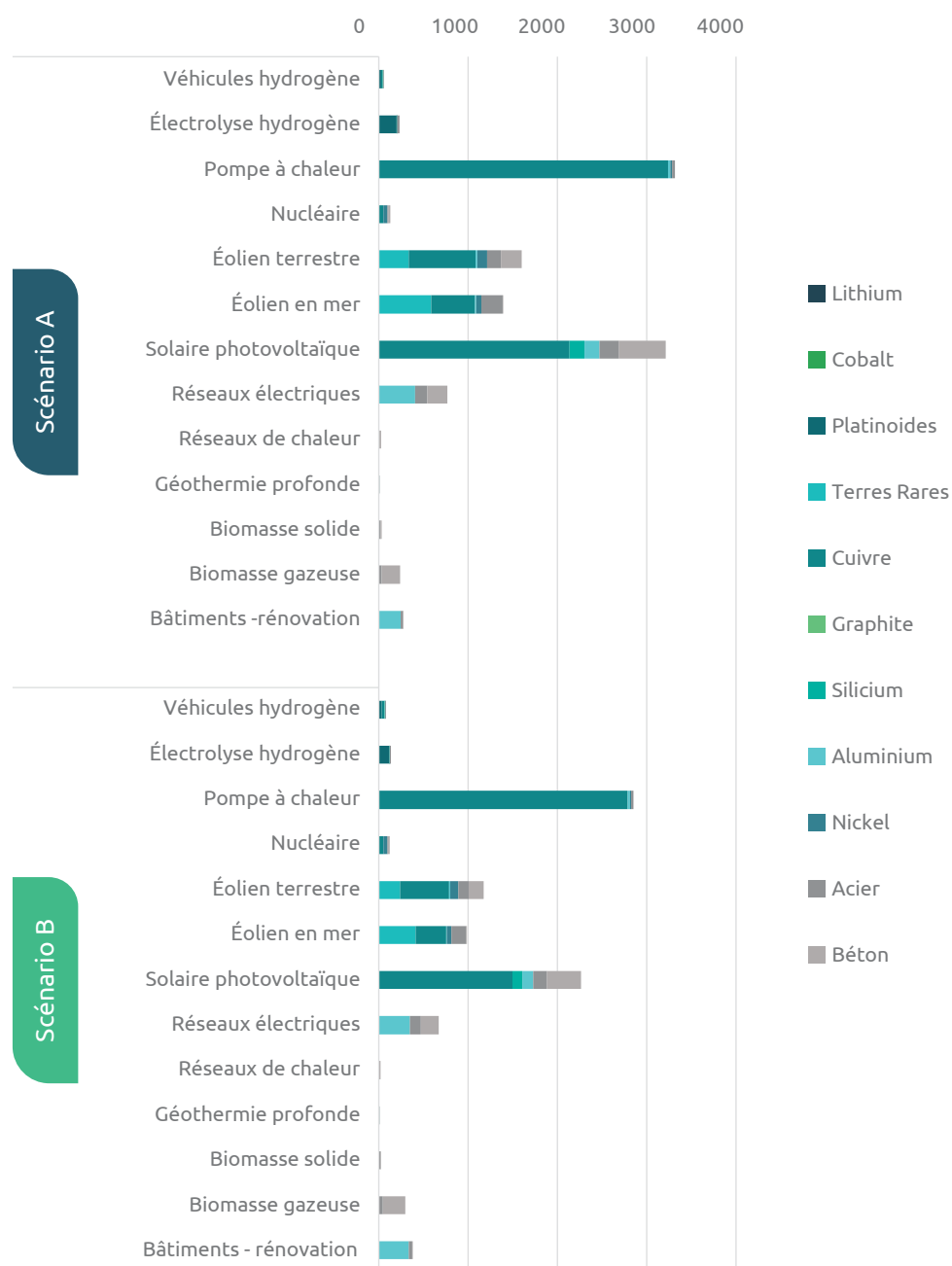
Figure 23: Millions d'euros.criticité des ressources et domaines de la SNBC en 2050 pour les deux scénarios A et B



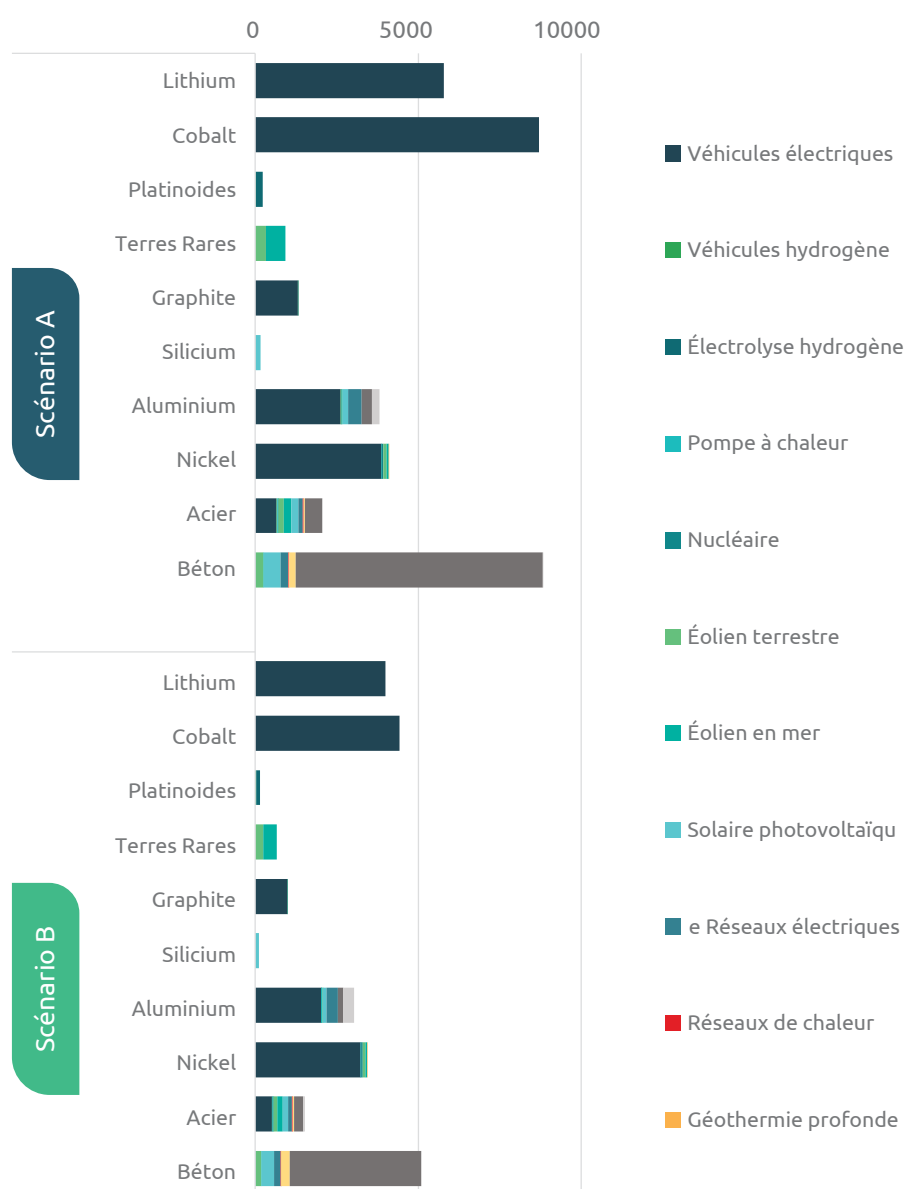
Besoin brut annuel par ressources en MEC



Besoin brut annuel par domaines en MEC (hors bâtiments - neuf et véhicules électriques)



Besoin brut annuel par ressource en MEC (hors cuivre)



2.3 L'ÉLECTRIFICATION : UNE FILIÈRE AU CŒUR DE LA DÉCARBONATION, MAIS QUI DÉPEND LARGEMENT DE RESSOURCES IMPORTÉES

2.3.1 Une place centrale dans les stratégies de transition bas carbone

En France et partout dans le monde, l'électrification joue un rôle majeur dans tous les scénarios publics de décarbonation et de sortie des énergies fossiles. La part de l'électricité dans l'énergie finale consommée est toujours fortement accrue, de 15 % à 25 % selon les principaux scénarios¹¹. Selon les hypothèses de sobriété et de mix énergétique, la consommation absolue d'électricité en TWh peut en revanche augmenter, se stabiliser ou même diminuer. Dans notre étude, le Scénario A est 10 % plus électrifié que le Scénario B, soit une différence d'un peu plus de 100 TWh.

Du fait de sa souplesse et de son universalité, l'électricité est un vecteur d'énergie incontournable pour la décarbonation des usages. Grâce aux réseaux électriques, elle est présente partout, à tout moment, et de façon silencieuse. Elle s'adapte à tous les usages au prix de plus ou moins de transformations et de technologies. Elle n'a pas d'alternative dans certains domaines comme l'éclairage et les technologies de l'information.

Les enjeux la concernant diffèrent tout au long de sa chaîne de valeur, de sa production, son transport et sa distribution via les réseaux électriques, jusqu'à ses usages finaux, comme la chaleur ou la mobilité.

Pour subvenir aux besoins croissants en électricité, le nucléaire, le solaire photovoltaïque, l'éolien en mer et l'éolien terrestre seront les principales formes de **production** d'électricité décarbonée, en plus de l'hydraulique historique et d'autres formes de production thermique fondées sur la biomasse qui permettront de se passer totalement de sources d'énergie fossiles. Dans les deux scénarios de notre étude, la production nucléaire est celle envisagée par le scénario N1 de RTE, soit une baisse de deux tiers par rapport à la production actuelle. Cela nécessitera la

construction de nouveaux réacteurs pour 13 GW. Entre aujourd'hui et 2050, la production solaire, éolienne terrestre et éolienne en mer sera multipliée par plus de 11 dans le Scénario A et par 9 dans le Scénario B.

En parallèle, les **réseaux électriques** joueront un rôle clé dans l'intégration d'une production décarbonée beaucoup plus décentralisée. La puissance du parc électrique raccordé sera multipliée par un facteur de 2,0 à 2,2, voire 2,5 si le mix intègre beaucoup d'hydrogène et de renouvelables¹². Grâce à l'étendue des réseaux électriques français et européens, il restera néanmoins possible d'équilibrer un système où la production comme la consommation seront beaucoup plus volatiles.

Enfin, les enjeux liés aux **usages de l'électricité** concernent principalement la production de chaleur et la mobilité. Les pompes à chaleur participent à la décarbonation du besoin en chaleur, qui compte pour 59 %¹³ de la consommation française d'énergie et pour lequel les énergies fossiles (fioul et gaz importés) sont encore majoritaires. Pour décarboner la mobilité, les véhicules électriques prendront une part massive du transport routier, qui est encore dépendant à 98 % des carburants liquides et à 90 % des carburants fossiles¹⁴. Dans les principaux scénarios¹⁵, l'électrification routière est estimée entre 91 % et 99 % pour le parc de véhicules légers et entre 17 % et 70 % pour le parc de véhicules lourds en 2050. Notre Scénario A s'aligne sur les hypothèses hautes, le Scénario B sur les hypothèses basses.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi d'inclure l'hydrogène à la filière de l'électrification pour deux raisons importantes : sa production par électrolyse requiert de l'électricité et les véhicules à hydrogène partagent la même motorisation que les véhicules électriques. En revanche, leur réservoir et leur pile à combustible leur permet d'avoir une batterie beaucoup plus petite.

¹¹ [DGEC 2020a] scénarios AMS gaz bas et haut, [RTE 2021a], [ADEME 2021a].

¹² Le scénario B suppose une multiplication de la puissance nominale du parc par 2,5. Le scénario A suppose une multiplication de la puissance nominale du parc par 1,9. Le calcul des ressources nécessaires au développement du réseau s'est fait par extrapolation des éléments fournis par [RTE 2021a] dans son chapitre Réseaux pour les scénarios N1 et N2.

¹³ [ADEME 2021a], 619 TWh PCI sur 1044 TWh PCI d'énergie finale consommée dans les secteurs résidentiel, tertiaire et industriel.

¹⁴ [DATLAB 2020b]

¹⁵ [DGEC 2020a] scénarios AMS gaz bas et haut, [RTE 2021a], [ADEME 2021a].

2.3.2 Lithium, cobalt, platinoïdes : des ressources critiques contrôlées par un petit nombre de pays extra-européens

Du point de vue de leur score de criticité, les ressources nécessaires à l'électrification se classent en trois grandes familles : les ressources à forte criticité, les ressources préoccupantes, et les ressources à criticité mineure.

Les ressources à forte criticité, rares et incontournables

Le **lithium, le cobalt, les platinoïdes et les terres rares** forment la famille des ressources à forte criticité (Figure 14). Étant donné la hausse de la demande, les réserves disponibles du lithium, du cobalt et des platinoïdes s'épuiseront en effet en moins de 50 ans. Elles seront pourtant absolument indispensables à l'électrification.

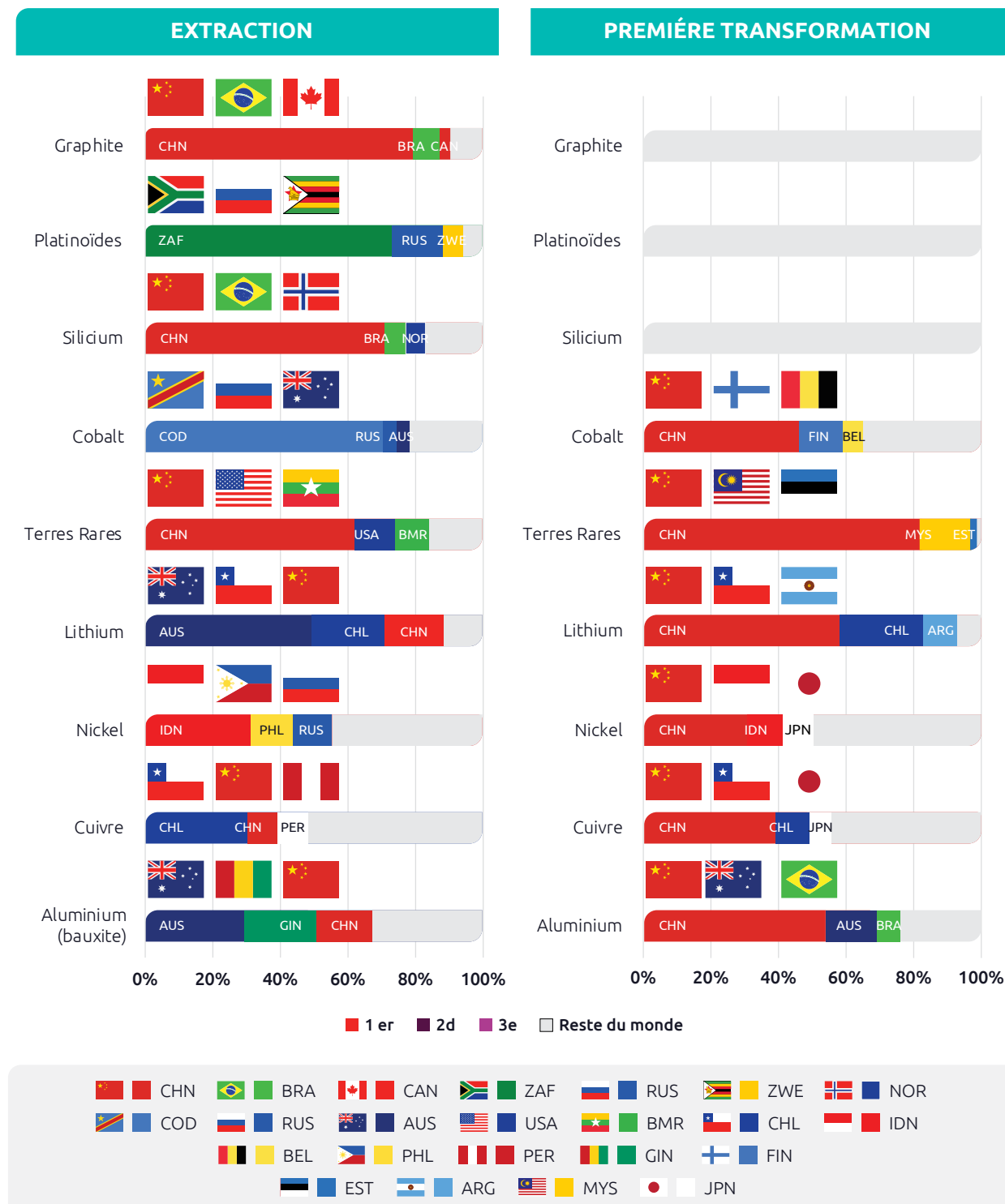
Le marché de ces ressources est de nature oligopolistique, les trois principaux pays producteurs se partageant, chaque fois entre 65 % à 98 % du marché de l'extraction et/ou de la première transformation (Figure 24). La Chine figure parmi les trois premiers acteurs pour toutes les ressources, que ce soit au titre de l'extraction et plus encore de la première transformation. La Russie, pour sa part, fait partie du Top 3 pour le lithium, le cobalt, les platinoïdes, de façon toutefois moins dominante.

En ce qui concerne les terres rares, leur score élevé de criticité n'est pas lié à un manque de réserves, abondantes sur le territoire européen (le terme « rare » fait référence à leur faible teneur dans le minerai, et non à leur rareté dans le sous-sol). En revanche, c'est le monopole exercé par la Chine sur la première transformation, dont elle contrôle plus de 80 % à l'échelle mondiale, qui fait peser de forts risques sur l'approvisionnement.

Les domaines touchés en premier lieu par cette criticité élevée sont les **véhicules électriques, les véhicules à hydrogène, l'électrolyse de l'hydrogène**, ainsi que certains segments technologiques de l'éolien (Figure 15). Ces quatre ressources sont également utilisées par de nombreux secteurs industriels stratégiques. Plus encore que dans le cas du pétrole, cette structure oligopolistique du marché constitue un risque majeur pour l'indépendance de la France et de l'Europe, avec une menace tangible sur la disponibilité des ressources à court terme. Ceci restera vrai tant que le marché ne sera pas ouvert à davantage d'acteurs, ou que n'auront pas été trouvées d'alternatives technologiques et/ou d'approvisionnement.



Figure 24: Concentration des pays acteurs dans l'extraction et la première transformation des ressources minérales (par ordre décroissant de part de marché du premier pays extracteur)



Les ressources minérales sont toutes importées et entre les mains d'oligopoles. La dépendance énergétique aux acteurs extra-européens, tout particulièrement à la Chine, est très élevée dans les domaines de l'électrification et insécurise les approvisionnements.

Les autres ressources préoccupantes au cœur de l'électrification

Le second groupe de ressources, qui affichent des scores préoccupants, comprend le **cuivre, le graphite, l'aluminium, le silicium et le nickel** (Figure 14).

On dispose au niveau mondial de faibles réserves en cuivre et en aluminium, deux ressources dont l'extraction et la transformation ont aussi un fort impact environnemental et social. De plus, le cuivre et le nickel sont difficilement substituables car il existe peu d'alternatives. Quant au graphite et au silicium, ils sont difficilement recyclables et leur extraction/transformation est elle aussi concentrée à 80 %-90 % entre les mains de trois pays, dont la Chine pour 70 % à 80 % (Figure 24).

Si ces ressources présentent une criticité un peu moindre que la catégorie précédente, elles n'en sont pas moins capitales car elles sont essentielles à certaines solutions au cœur de l'électrification décarbonée. Le solaire photovoltaïque repose de façon écrasante sur le silicium. Les véhicules électriques et les batteries ont impérativement besoin de graphite. Enfin, toute la chaîne de valeur de l'électricité nécessite, à différents stades et degrés, du cuivre, de l'aluminium et du nickel.

Enfin, pour la filière de l'électrification, seuls le béton et l'acier présentent une faible criticité et, même si l'acier est peu substituable, ils peuvent être considérés de préoccupation mineure.

Des domaines clés très exposés aux contraintes de ressources

En résumé, les scores de criticité indiquent que les domaines les plus intrinsèquement (i.e. hors effet de volume) exposés aux contraintes de ressources seront les **véhicules électriques, les véhicules à hydrogène et les électrolyseurs** car tous nécessitent des ressources à criticité forte ou préoccupante : les véhicules électriques nécessitent du cobalt, du lithium et du cuivre ; les véhicules à hydrogène et les électrolyseurs nécessitent des terres rares, des platinoïdes et du graphite.

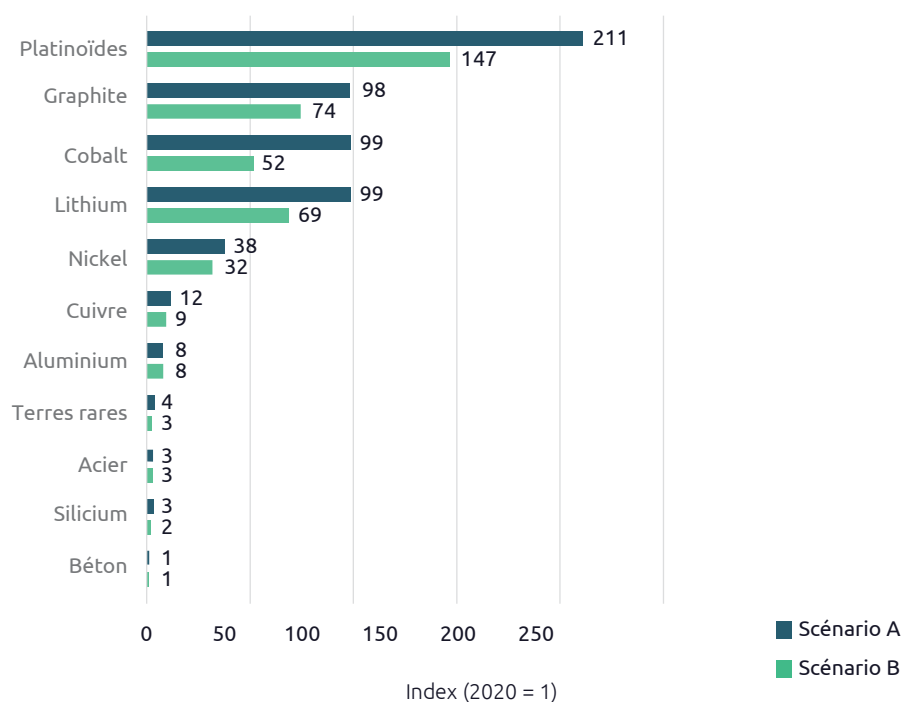
Moins vulnérables, les domaines de **l'éolien et des pompes à chaleur** méritent néanmoins une attention particulière car ils ont besoin de cuivre, d'aluminium et, pour certaines technologies éoliennes, de terres rares.

Enfin, le **solaire photovoltaïque, le nucléaire et les réseaux électriques** ne mobilisent pas de ressources critiques, mais ils consomment des ressources néanmoins préoccupantes : cuivre, aluminium et silicium pour le solaire ; cuivre et aluminium pour les réseaux de chaleur ; cuivre et nickel, enfin, pour la construction des installations nucléaires.

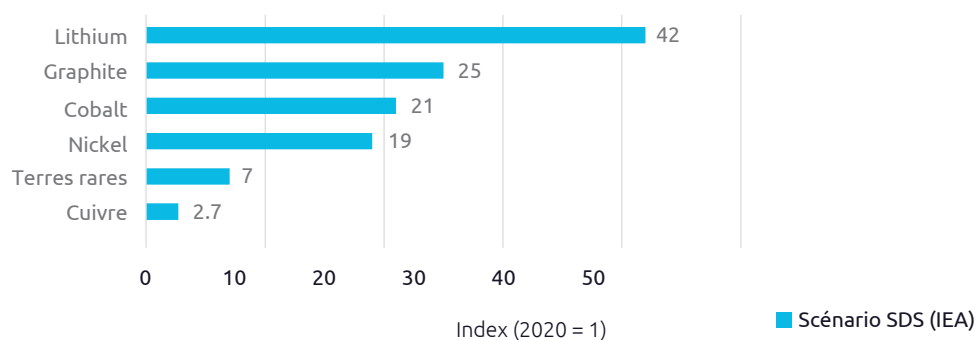


Figure 25: Les besoins bruts en ressources pour la transition énergétique vont drastiquement augmenter dans le monde et en France d'ici 2040

Multiplication du besoin en France entre 2020 et 2040



Multiplication du besoin dans le monde entre 2020 et 2040



La compétition pour l'accès aux ressources sera mondiale. L'électrification massive en France démultipliera le besoin brut en ressources minérales, plus que dans le reste du monde¹⁶. La France ne sera pas la seule à vouloir sécuriser son approvisionnement.

¹⁶ En toute rigueur, les deux graphiques ne sont pas directement comparables. Le graphique de du haut est le résultat de la méthodologie employée dans la présente étude. Il compare les besoins (en tonnes) entre 2020 et 2040 sur le périmètre des 15 domaines considérés. Le graphique de de la partie inférieure est tiré de [IEA 2020a]. Il compare les besoins (en tonnes) d'un nombre plus restreint de domaines en 2040 avec la totalité des besoins en 2020. On peut toutefois en déduire que la hiérarchie des besoins en ressources est identique et que la France, étant un pays plus industrialisé et plus engagé dans la stratégie bas carbone que la moyenne mondiale, subira d'autant plus la concurrence internationale pour importer ces ressources – d'où l'importance de renforcer l'industrialisation française sur le mode circulaire pour diminuer le besoin net en importations.

2.3.3 Cuivre et aluminium : des ressources rendues critiques par l'effet volume considérable des véhicules électriques

L'analyse précédente est une analyse intrinsèque des scores de criticité (Figure 14). Elle ne tient pas compte des volumes à engager dans la SNBC française.

Un score de criticité intrinsèque élevé signale une condition nécessaire à la réussite d'un domaine de la SNBC, même lorsque les quantités requises sont faibles. Autrement dit, il est impératif d'avoir accès dans de bonnes conditions économiques, géopolitiques, environnementales et sociales au lithium, au cobalt, aux platinoïdes, aux terres rares, au graphite, pour agir dans les domaines de la mobilité électrique, de l'hydrogène ou de la productions d'électricité renouvelables. En réduisant les besoins d'importation de ces différentes ressources, l'approche circulaire ERRR permet d'engager la transition bas carbone dans de meilleures conditions. L'accès aux ressources les plus intrinsèquement critiques constitue une condition nécessaire, mais pas pour autant suffisante. Les volumes entrent aussi en ligne de compte.

C'est pourquoi nous avons introduit l'évaluation en millions d'euros.criticité (MEC) qui, pour arbitraire qu'elle soit¹⁷, permet de prendre en compte tout à la fois les volumes, la dimension économique et la gravité des impacts à une échelle quantitativement significative. Elle donne de ce fait une indication synthétique utile pour la décision politique.

On constate alors (Figure 22 et Figure 23) qu'il est tout aussi important d'agir sur des ressources intrinsèquement moins critiques, mais qui le deviennent du fait des quantités nécessaires : **cuivre, aluminium, nickel**. La réussite de la SNBC dépendra de la capacité à garantir un approvisionnement suffisant et dans de bonnes conditions de ces métaux.

L'approche en MEC confirme ainsi que la **mobilité électrique** constitue l'immense défi de la SNBC sous contrainte de ressources. Les véhicules électriques sont très consommateurs de ressources à forte criticité intrinsèque, en particulier sur les aspects géostratégiques, sociétaux et environnementaux, comme le lithium et de ressources comme et le cuivre, dont la criticité est un peu moindre d'un point de vue géostratégique mais équivalente sur les aspects environnementaux et sociétaux. Enfin, et surtout, la mobilité électrique nécessitera la fabrication de

plusieurs dizaines de millions de véhicules (qui plus est, remplacés plusieurs fois) d'ici 2050 avec toutes les exigences et les conséquences d'une telle production industrielle de masse.

L'examen des résultats hors véhicules (Figure 22 et Figure 23) montre que d'autres domaines de l'électrification sont aussi concernés par les contraintes de ressource, quoique à un degré moindre. Ce sont les **pompes à chaleur, le solaire et les centrales éoliennes**.

Comme les véhicules électriques, les pompes à chaleur sont un marché de masse. Toutefois, une pompe à chaleur réclame moins de matière qu'un véhicule individuel, elle est remplacée moins souvent, et tous les ménages n'en seront pas équipés.

Le solaire a l'empreinte en cuivre et en béton la plus importante parmi les modes de production d'électricité. Concernant le cuivre, les fermes solaires nécessitent de longs métrages de connexion et de nombreux onduleurs. Pour le béton, on se serait plutôt attendu à trouver l'éolien en tête des besoins quand on songe à la taille imposante des fondations des éoliennes terrestres et maritimes. Mais la structure de chaque panneau solaire étant fixée à des plots en béton, ou à une tranchée bétonnée courant sur toute la longueur d'une rangée de panneaux, les fermes solaires réclament au total davantage de béton. Cette conclusion est plus nette encore quand on analyse les intensités par unité d'œuvre (voir les Figure 16, Figure 18, et le paragraphe 2.4.2).

2.3.4 L'importance déterminante des leviers de sobriété, de recyclage, de réemploi et d'écoconception pour l'électrification

On vient de le voir, la capacité à réunir toutes les ressources nécessaires sera impérative à la réussite de la SNBC. Pour y parvenir dans des conditions acceptables, aucun levier ne doit être négligé, à commencer par ceux qu'offre l'économie circulaire qui, d'une part, permettent de réduire les besoins et, d'autre part, de diversifier et relocaliser les sources d'approvisionnement. Dans cette section, nous quantifions ces avantages au travers de nos deux scénarios A (circularité faible) et B (circularité renforcée). Nous présentons ces leviers par ordre de priorité des efforts à fournir, calculée sur la moyenne des scores pour les 9 domaines liés à l'électrification (Figure 26).

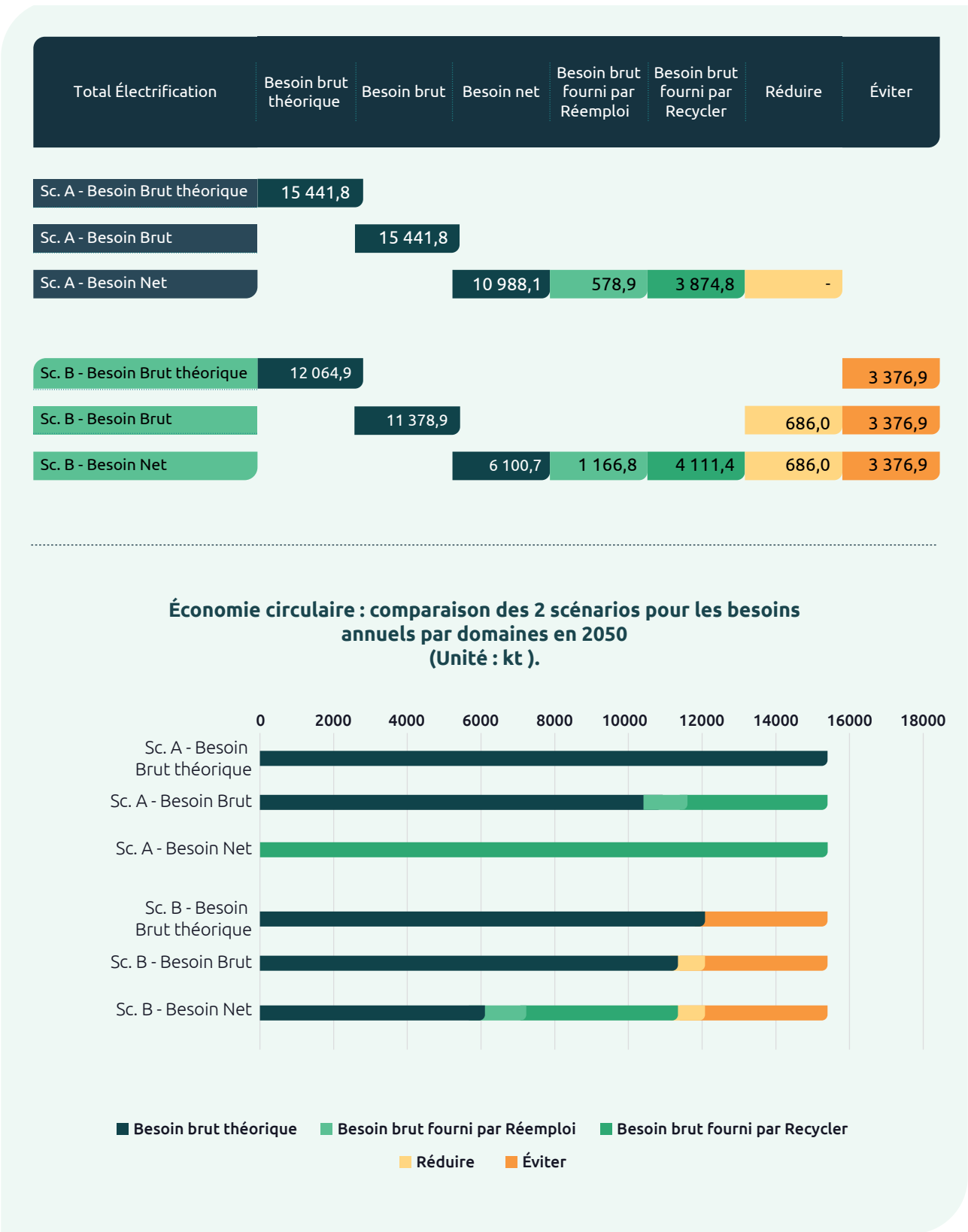
¹⁷ Voir la méthodologie présentée Figure 5.. Pour chaque ressource, le chiffre, exprimé en millions d'euros.criticité (MEC), est égal au produit de trois facteurs : le volume (en kt), la valeur à l'importation (en euros) et l'indice d'impact (100 pour le score 5 de criticité majeure, 10 pour le score 3 de criticité moyenne, 1 pour le score 1 de non criticité). Les besoins bruts, tirés des scénarios A et B, correspondent aux quantités de ressources nécessaires à la fabrication des équipements avant de prendre en compte qu'une partie de ces besoins peut être couverte par le recyclage et le réemploi.

Figure 26: Maturité des leviers circulaires dans la filière Électrification et priorité des efforts à fournir

		Domaines									
		Moyenne des scores	Véhicules électriques	Véhicules hydrogène	Électrolyse hydrogène	Pompe à chaleur	Nucléaire	Éolien terrestre	Éolien en mer	Solaire photovoltaïque	Réseaux électriques
Maturité actuelle 2020	Éviter	2.1	3	3	1	2	2	2	2	2	2
	Réduire	2.3	2	2	2	1	1	4	4	3	2
	Réemployer	1.3	2	1	1	2	1	1	1	1	2
	Recycler	2.0	3	1	1	2	2	2	2	2	3
	Écoconception	2.2	2	2	2	2	1	3	3	3	2
	Organisation filières et territorial	2.1	2	1	1	2	2	3	3	3	2
	Digital	2.9	3	3	3	2	3	3	3	3	3
	Recherche & Développement et innovation	2.8	4	2	2	2	3	3	3	3	3
	Réglementaire et financier	2.8	3	2	2	3	4	2	2	4	3
	Maturité actuelle globale	2.3	2.7	1.9	1.7	2.0	2.1	2.6	2.6	2.7	2.4
Priorité des efforts à faire 2020 - 2050	Éviter	4.2	5	5	4	4	4	4	4	4	4
	Réduire	3.2	4	4	3	3	2	3	3	4	3
	Réemployer	4.1	4	4	4	5	4	4	4	4	4
	Recycler	5.0	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Écoconception	4.8	5	5	5	5	3	5	5	5	5
	Organisation filières et territorial	2.8	4	2	3	3	3	2	2	3	3
	Digital	3.1	3	3	3	4	3	3	3	3	3
	Recherche & Développement et innovation	3.4	5	5	5	3	2	2	2	5	2
	Réglementaire et financier	3.2	3	4	4	4	2	4	4	2	2
	Priorité d'efforts globale	3.8	4.2	4.1	4.0	4.0	3.1	3.6	3.6	3.9	3.4

Des efforts importants sont à fournir pour atteindre les objectifs en 2050, notamment sur les leviers d'action circulaire Écoconception, Éviter, Réemployer et Recycler

Figure 27: Besoins totaux en ressources des domaines de l'électrification et de l'hydrogène (kt par an en 2050)



Priorité au tri et au recyclage des matériaux qui ont l'impact le plus fort (levier Recycler)

Dans le Scénario A comme dans la Scénario B, le recyclage peut fournir une part très importante des besoins bruts de l'électrification en 2050 (respectivement 25,1 % et 36,1 %, [Figure 27](#)), et donc diminuer d'autant les dépendances et les freins liés à l'obtention de ces ressources. Il est donc essentiel de structurer des filières de valorisation réunissant un écosystème d'acteurs capables de collecter, trier et recycler les matériaux concernés.

L'évolution de la réglementation sera clé pour permettre la collecte et le tri des batteries, des piles à combustible et des divers objets contenant du cuivre et de l'aluminium, dont les taux de recyclabilité sont intéressants (respectivement 43 % et 65 % en 2050, [Figure 40](#) et [Figure 42](#)).

Le soutien réglementaire et économique aux chaînes de valeur de la revalorisation, à l'échelle nationale ou territoriale, doit aussi favoriser la circulation des matières entre les différents domaines lorsque cela est envisageable.

En liaison avec le levier Écoconception, les produits et équipements devront également être conçus de manière à ce qu'ils soient aisément démontables et recyclables.

Enfin, la recherche et le développement (R&D) doivent être accélérés pour mettre au point des techniques de séparation, d'extraction et de purification des matériaux plus efficaces et moins polluantes.

Favoriser la sobriété pour limiter les consommations évitables et optimiser l'allocation des ressources (levier Éviter)

La comparaison entre les Scénarios A et B montrent que les efforts en matière de sobriété sont loin d'être anecdotiques puisqu'ils pourraient permettre, à eux seuls, de réduire de 21,9 % les besoins en ressources pour l'électrification en 2050 ([Figure 29](#)), et donc de créer, sur tous les plans, des marges de manœuvre saluables. Il convient donc de limiter autant que faire se peut la consommation énergétique en généralisant l'adoption des écogestes à l'échelle individuelle ou en mettant en œuvre des plans d'économie d'énergie à l'échelle des entreprises, des associations ou des collectivités. Il est indispensable d'améliorer la performance énergétique des bâtiments et des équipements dans l'industrie, le tertiaire et l'habitat.

Le développement et l'adoption de modèles d'affaires tournés vers l'économie partagée et de fonctionnalité est également primordial. Privilégier l'usage sur la possession permettra de limiter l'autosolisme et de

décarboner la mobilité en favorisant les transports en commun et la mobilité électrique légère en milieux urbain et péri-urbain.

Dans la perspective d'un usage donné, on cherchera à utiliser les matériaux les moins critiques, notamment dans les domaines de production amont, ce qui nécessitera une réflexion globale. On pourra, par exemple, privilégier les biomasses ou la chaleur directe pour certains types de chauffage et pour une meilleure résilience, les batteries LFP (lithium-fer-phosphate) qui ne contiennent ni cobalt, ni nickel et moins de lithium, ou encore les électrolyseurs alcalins, peu consommateurs de ressources minérales, plutôt que les PEM, composés des platinoïdes.

Certaines technologies très consommatrices de ressources devront ainsi être réservées à des usages finaux pour lesquels elles présentent des avantages importants et une nette supériorité par rapport à d'autres solutions, ou lorsqu'aucune alternative n'est envisageable. C'est par exemple le cas pour l'hydrogène et la mobilité lourde.

Accroître la réutilisation des matériaux via l'allongement de la durée de vie des équipements (levier Réemployer)

La réparation et le reconditionnement des infrastructures et des produits permettent de réduire la fabrication de nouveaux éléments et donc les besoins de matières premières vierges. Les cellules photovoltaïques, les anodes et les cathodes défectueuses ou usagées peuvent être remplacées et re-dirigées vers des filières de revalorisation adéquates avant d'être réinjectées dans les circuits de production.

La réutilisation de certains équipements d'abord utilisés dans un contexte exigeant pour un autre usage qui le serait moins leur offrirait une seconde vie « directe ». Par exemple, des panneaux solaires « professionnels » dont les performances commenceraient à baisser pourraient être redéployés chez des particuliers, où ils seraient suffisants. De même, les piles à combustible et les batteries devenues insuffisantes pour la mobilité pourraient être réemployées pour des usages stationnaires.

Figure 28: Potentiel des leviers circulaires : illustration dans le domaine de l'éolien terrestre

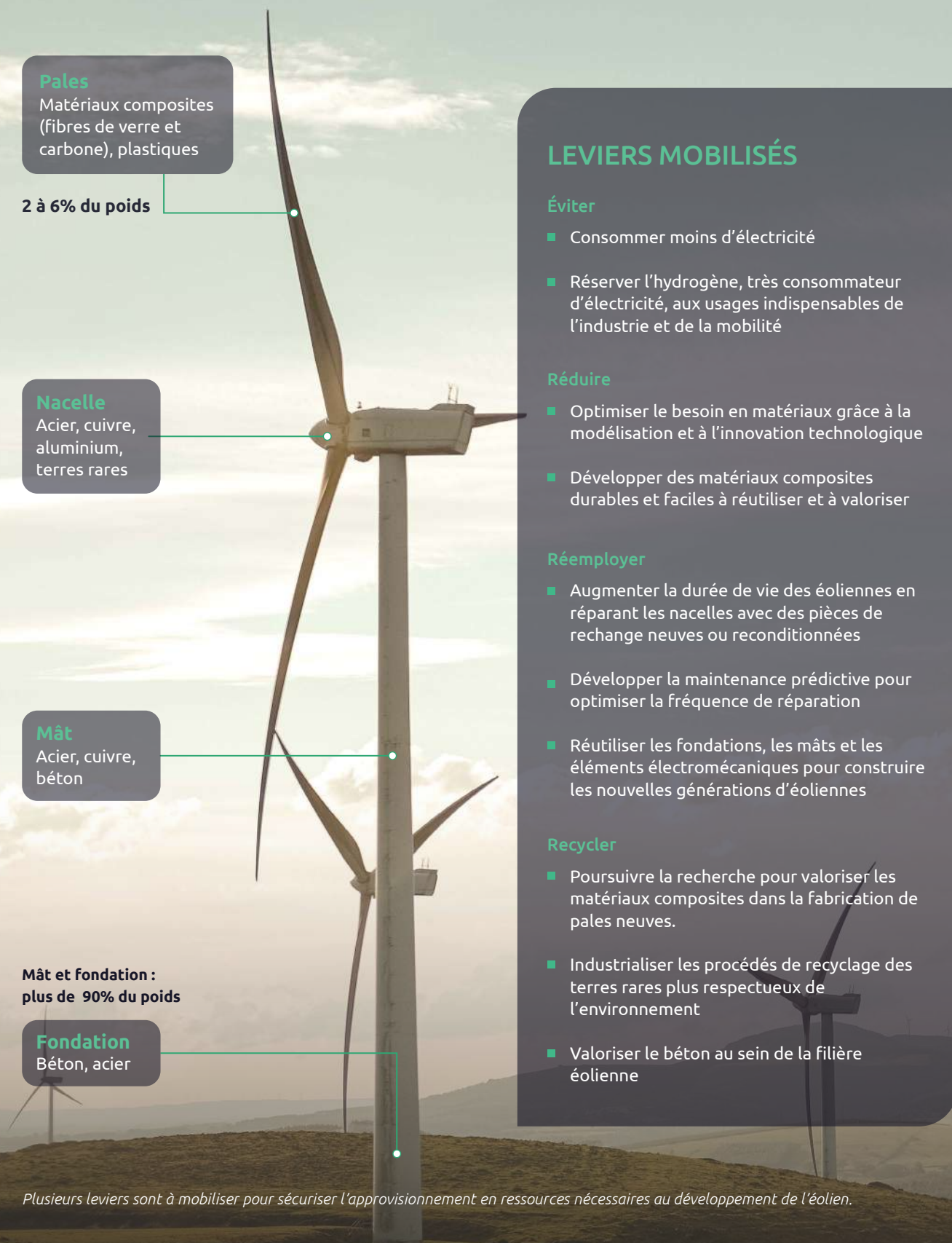
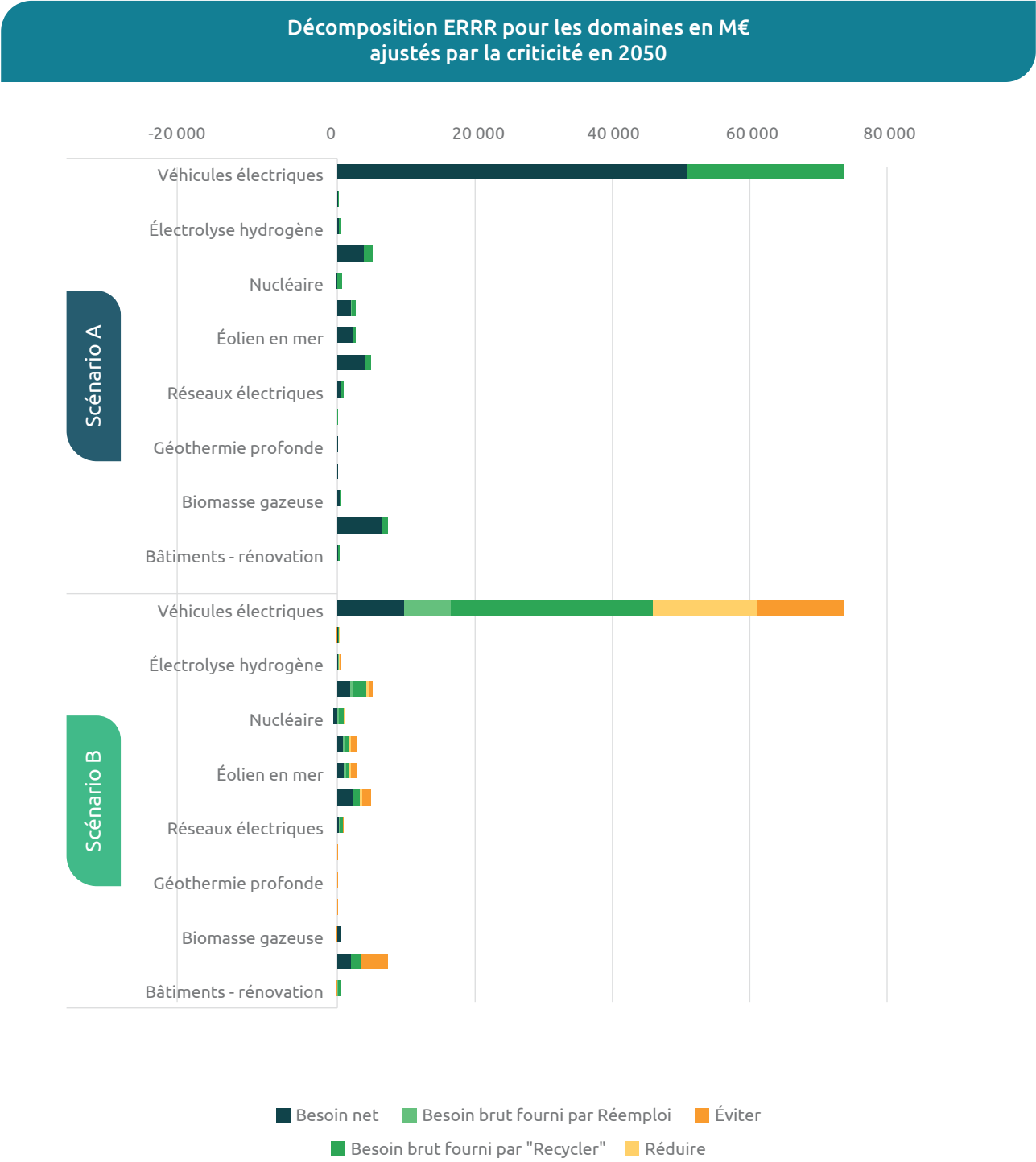
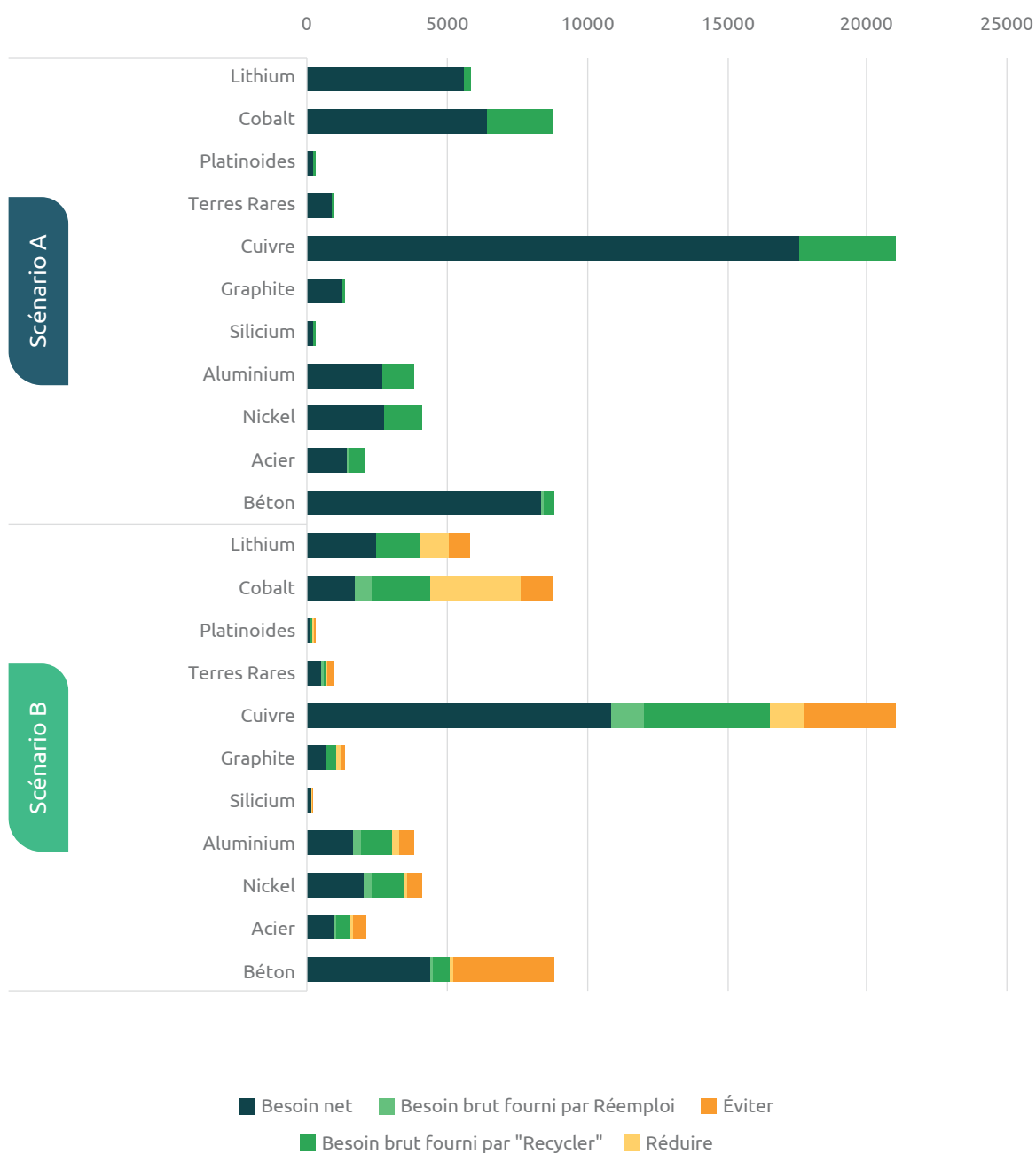


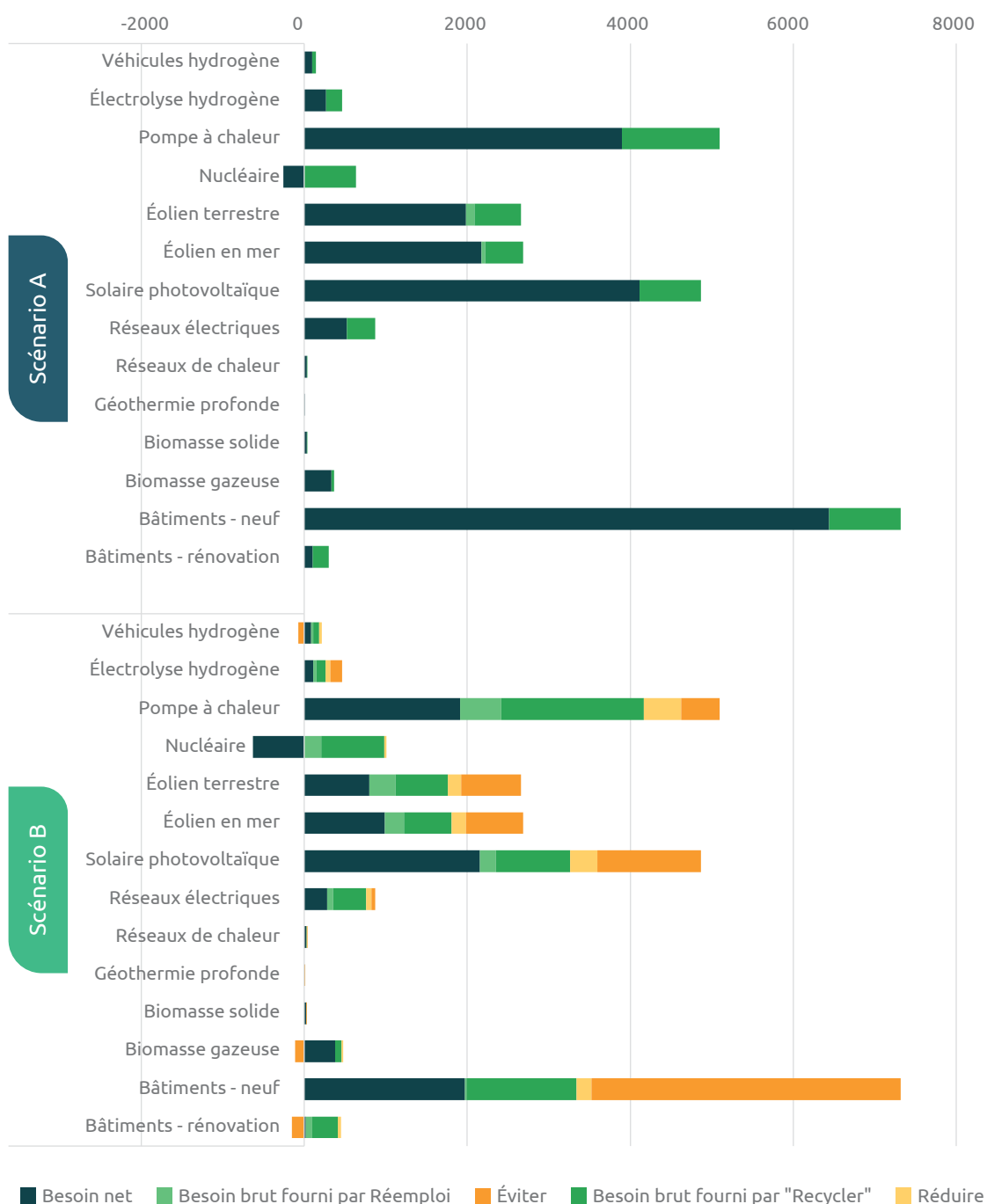
Figure 29: Bénéfices des leviers circulaires ERRR pour les ressources et les domaines de la SNBC dans les scénarios A et B (en MEC millions d'euros.criticité annuels 2050, avec et sans les véhicules électriques)



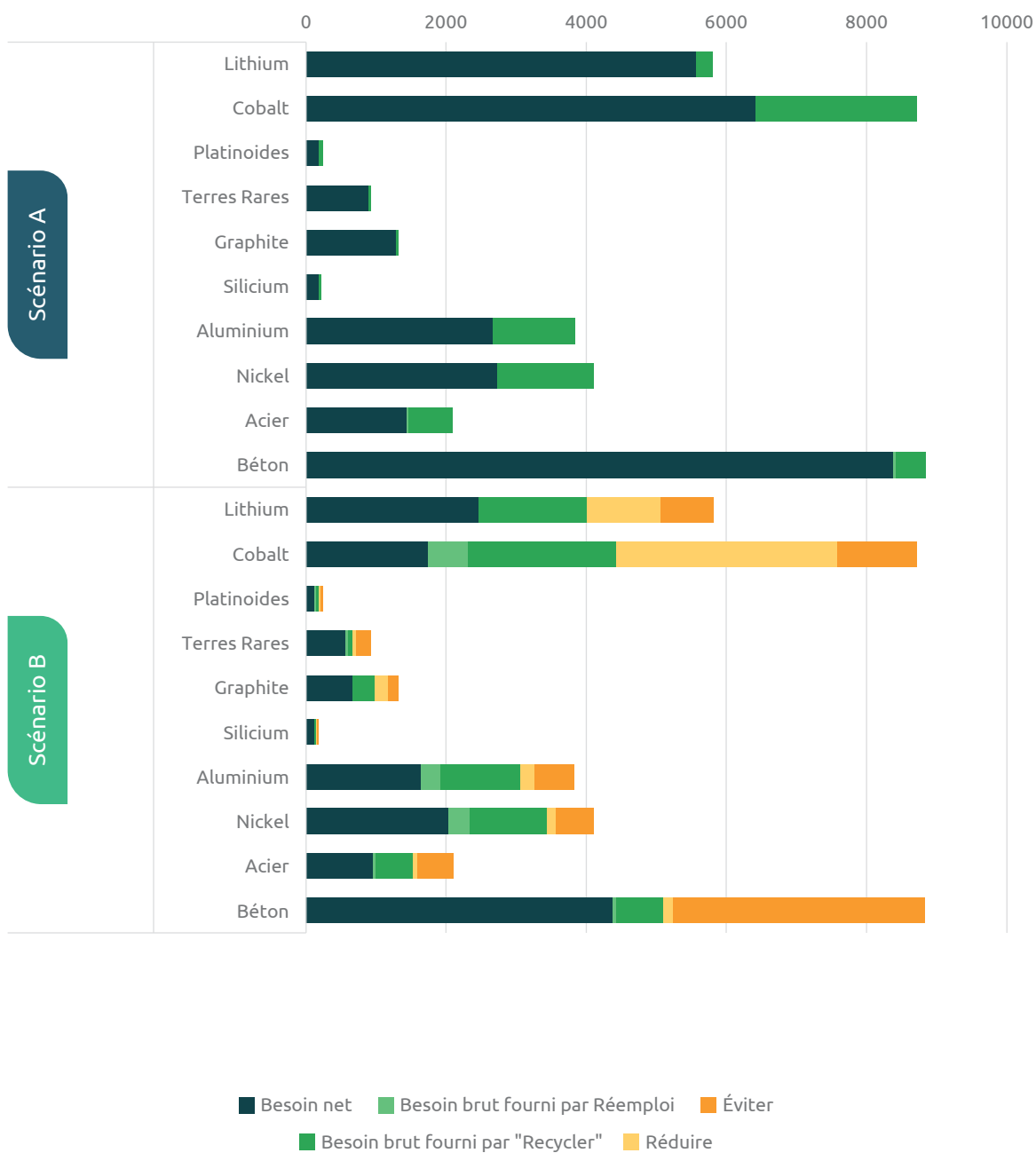
Décomposition ERRR pour les besoins en ressource en M€ ajustés par la criticité en 2050



Décomposition ERRR pour les domaines (hors véhicules électriques) en M€ ajustés par la criticité en 2050



Décomposition ERRR pour les besoins en ressource en M€ ajustés par la criticité en 2050 - hors cuivre



Concevoir des systèmes plus résilients, plus durables, et moins consommateurs de ressources (levier Écoconception)

L'écoconception et le maintien en condition opérationnelle des équipements tels que les piles à combustibles, les batteries, les électrolyseurs et les éoliennes favorisent l'allongement de leur durée de vie. La maintenance prédictive permet d'intervenir plus tôt et à moindre coût, avant que ne surviennent des dégradations irréversibles.

Un des aspects de l'écoconception consiste à prévoir la possibilité de réparer ou de restaurer les produits à l'aide de composants de seconde main, issus de l'économie circulaire. Il s'agit en particulier de concevoir des produits avec des matériaux moins intriqués de manière à faciliter les opérations de réparation in-situ et la déconstruction sélective, donc la récupération et le remplacement.

Un autre axe peut être d'opter délibérément pour des solutions de moindre technicité afin d'en réduire les coûts et l'empreinte environnementale, et d'en accroître la robustesse, la résilience et la longévité. En revanche, ce choix signifie aussi, souvent, des performances et des fonctionnalités plus limitées. Dans cette perspective, la réflexion comme les politiques de soutien se doivent d'intégrer les questions du modèle d'affaires et des risques.

Enfin, les outils de conception digitale permettront aussi d'optimiser les équipements et les installations pour n'utiliser que la juste quantité de matériaux nécessaire. Par exemple, développer des réseaux électriques intelligents permet d'économiser des

ressources lors de la rénovation et l'extension des réseaux existants. Ce type d'approche peut, et doit, être encouragé par la réglementation.

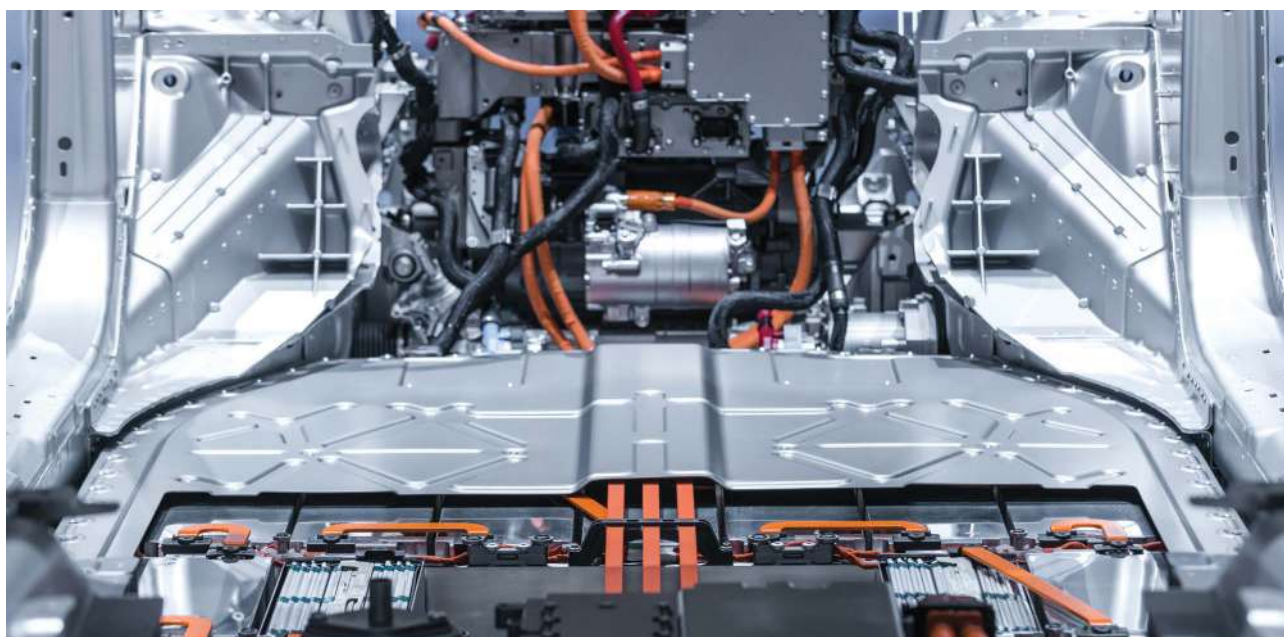
Sécuriser les ressources en utilisant le levier géopolitique et diplomatique

Pour les besoins nets, que ne peuvent couvrir ni le réemploi ni le recyclage, un approvisionnement en ressources « neuves » reste indispensable. Comme nous l'avons vu dans la [Figure 24](#), celles-ci proviennent très largement de l'étranger et il est donc indispensable d'évaluer les risques-pays en fonction des objectifs et du mix énergétique visés par la SNBC. Cet aspect, essentiel, a été largement couvert par des études récentes, comme le rapport de l'AIE de mai 2021 ou le rapport Varin de janvier 2022.

La diplomatie française des métaux doit se renforcer afin de limiter les risques sur l'approvisionnement, la fluctuation des prix, et de tensions géopolitiques dommageables.

Investir dans des industries d'exploration, d'extraction et de transformation en France et en Europe contribuerait à limiter la dépendance envers les pays à risques et servirait à amortir le surcoût de ces ressources locales. En effet, l'Europe n'extraît pas de terres rares, bien qu'elles soient abondantes sur son territoire, car la Chine maintient des cours imbattables.

Enfin, la constitution de stocks de matériaux critiques en quantités suffisamment importantes permettrait de surmonter d'éventuelles ruptures d'approvisionnement et donc de gagner en résilience et en souveraineté, comme c'est déjà le cas avec l'uranium pour le nucléaire.



2.4 LES BIOMASSES : LEUR VALORISATION EST INDISPENSABLE À LA SOUVERAINETÉ ÉNERGÉTIQUE, MAIS DOIT ÊTRE ORGANISÉE DANS LE RESPECT DES DIFFÉRENTS USAGES ET DE LA BIODIVERSITÉ

2.4.1 Les biomasses constituent actuellement la première forme d'énergie renouvelable et continueront à jouer un rôle de premier plan dans la SNBC

La biomasse désigne un ensemble de matières organiques dont la valorisation permet de produire de l'énergie. Par extension, nous utilisons ici le terme « biomasses », au pluriel, pour inclure les déchets non organiques également valorisables en énergie et les formes de valorisation solides, gazeuses ou liquides. Par souci de simplification, les trois grandes sources primaires de biomasses sont la forêt, l'agriculture (élevage et cultures) et les déchets urbains et industriels (DUI).

En 2019, le bilan énergétique national compte 320 TWh d'énergies primaires renouvelables¹⁸. Dans ce total, les biomasses et déchets renouvelables figurent largement au premier rang avec 177 TWh contre 104 TWh pour les énergies renouvelables électriques et 39 TWh pour les formes de chaleur renouvelables qui ne relèvent pas des deux familles précédentes.

Dans la SNBC2, publiée en janvier 2020, la production prévue d'énergies renouvelables et thermiques était de 233 TWh d'énergie primaire en 2020¹⁹. Dans les scénarios Gaz bas et Gaz haut, ce chiffre fait plus que doubler pour atteindre un peu plus de 500 TWh en 2050²⁰. Aujourd'hui, la somme des énergies renouvelables électriques, (hydraulique, éolien et solaire) s'élève à environ 75 TWh et pourrait atteindre près de 400 TWh à 480 TWh en 2050 selon les scénarios N1 et N2 de RTE²¹.

L'avantage de la biomasse réside dans sa disponibilité à tout moment, contrairement aux énergies renouvelables électriques qui sont intermittentes. Les

premières générations de valorisation de la biomasse (méthanisation...) occasionnent peu de pertes (de 0% à 20 %) entre l'énergie primaire et l'énergie finale consommée, d'où le terme parfois utilisé « d'usage direct de l'énergie ». Les générations suivantes se fondent sur des transformations chimiques plus poussées, qui occasionnent des pertes de rendement mais permettent de valoriser d'autres formes de biomasses à l'image de la pyrogazéification²². Ces nouvelles générations sont des vecteurs d'énergie à part entière comme l'électricité ou l'hydrogène. Par ailleurs, les formes gazeuses et liquides sont plus aisément stockables et transportables que les formes solides.

Notons que les trois catégories de sources de biomasse (forêt, agriculture, DUI) permettent chacune d'obtenir les trois formes finales consommables, solide, gazeuse ou liquide.

La biomasse liquide correspond au biocarburant que l'on obtient à partir de certains coproduits de l'industrie agroalimentaire, de cultures pour la première génération, et de résidus de cultures et de bois pour la seconde génération. À l'horizon 2050, elle se destine en priorité à l'aviation, où il existe peu d'alternatives au kérosène, puis aux transports terrestres, à commencer par les véhicules lourds ayant besoin d'autonomie. À ce jour, cette ressource reste très peu prise en compte dans les différents scénarios.

La biomasse solide, quant à elle, est utile dans les usages stationnaires en combustion, essentiellement en chaleur directe pour les ménages, pour les réseaux de chaleur et, plus marginalement, pour la production d'électricité cogénérée. Elle provient du bois, des déchets et des résidus agricoles.

Enfin, la biomasse gazeuse est produite sous forme de biogaz (purifié ensuite en biométhane) ou de gaz de synthèse à partir des déchets de cultures agricoles, des effluents d'élevage, des coproduits de l'industrie agroalimentaire et des déchets urbains et industriels, ou à partir du bois, grâce aux processus de méthanisation, de pyrogazéification ou de gazéification hydrothermale.

¹⁸ [DATALAB 2020a]

¹⁹ Ces 233 TWh renouvelables non électriques correspondent à un périmètre proche des 177 TWh + 39 TWh du paragraphe précédent.

²⁰ [DGEC 2020a]

²¹ [RTE 2021a]

²² La pyrogazéification permet de passer des multiples formes de bois, issus des forêts ou de déchets solides, à du méthane standard transitant par le réseau avec un rendement cible en 2050 de 67%.

Cette étude traite plus particulièrement des formes solides et gazeuses²³, et s'appuie pour cela sur les potentiels ultimes²⁴ et les taux de mobilisation issus des dernières sources publiées²⁵. Elle montre qu'il existe, pour ces formes, un potentiel primaire disponible total de 397 TWh PCS en bois-forêt, agriculture et DUI.

Aux volumes de biomasses gazeuses, peuvent s'ajouter dans les deux scénarios A et B jusqu'à 40 TWh de méthanation. Cette technique relève de la filière électrification et hydrogène. Elle permet de produire du méthane de synthèse en faisant réagir du dioxyde de carbone coproduit par la méthanisation (dimension circulaire) avec de l'hydrogène, lequel peut être en partie produit en exploitant la production excédentaire d'installations d'électricité renouvelable. Ainsi, par la combinaison d'hydrogène avec du CO2 provenant de l'épuration du biogaz, la méthanation optimise la valorisation de la biomasse, en augmentant de près de 80% la production de gaz vert pour une même quantité de biomasse initiale. Cette voie de valorisation participe également à réduire la dépendance de la France aux importations de gaz naturel, en particulier russe.

2.4.2 Outil de souveraineté, les biomasses doivent composer avec les contraintes de surfaces, d'usages et de pression sur la biodiversité

Pour les ressources minérales, l'analyse de la criticité incite à privilégier les biomasses solides, puis gazeuses, à l'électrification... quand l'usage le permet

La filière des biomasses permet de décarboner la chaleur, le gaz et la mobilité tout en réduisant les importations nécessaires en métaux, minéraux et gaz fossile. La criticité de la filière des biomasses s'élève à 2,0, ce qui est inférieur à la criticité moyenne de la filière électrification et hydrogène (Figure 15). Ce chiffre n'est cependant pas négligeable. Cela s'explique par la limitation des surfaces disponibles et des ressources du vivant, et par la compétition des usages entre énergie, alimentation humaine et animale, valorisation des matières pour l'industrie et la construction, et divers usages agricoles et forestiers comme le développement de puits de carbone.

L'analyse quantitative des intensités matières confirme l'intérêt des biomasses solides, les moins intenses, et des biomasses gazeuses, d'intensité intermédiaire, par rapport aux solutions impliquant l'électricité et l'hydrogène.

La Figure 16 montre que la filière des biomasses et de la chaleur a une intensité en métaux et minéraux critiques (parties vertes des barres) quasiment nulle en comparaison de celle de la filière électrique. Celle-ci au contraire s'étend de 17 c€.criticité/kWh pour le nucléaire à une fourchette de 100 à 200 c€.criticité/kWh pour l'éolien et le photovoltaïque. Cela concerne aussi le réseau de chaleur lui-même dont la criticité est négligeable par rapport au réseau électrique.

La prise en compte du béton et de l'acier (totalité des parties grises et vertes de la Figure 16) confirme l'intérêt des biomasses solides, de la géothermie et des réseaux de chaleur, qui sont les plus compétitifs (<10 c€.criticité/kWh). Puis viennent les différentes formes de biomasses gazeuses, qui ont une intensité moyenne de 20 c€.criticité/kWh, du même ordre de grandeur que le nucléaire ou le mix actuel, mais inférieures à l'intensité moyenne de 140 c€.criticité/kWh de l'électricité en 2050.

Des nuances apparaissent toutefois lorsqu'on compare les mérites respectifs des formes de production qui comptent le plus de TWh dans le futur mix, qu'elles viennent de la filière biomasses ou de la filière électricité et hydrogène. On a d'abord la pyrogaséification (4 c€.criticité/kWh), puis le nucléaire (17 c€.criticité/kWh) et la méthanisation agricole (26 c€.criticité/kWh). Très largement supérieures, viennent ensuite l'éolien en mer (133 c€.criticité/kWh), l'éolien terrestre (200 c€.criticité/kWh) et le solaire photovoltaïque (302 c€.criticité/kWh), mais aussi l'hydrogène et la méthanation issues du mix électrique moyen du scénario B²⁶ avec respectivement 241 c€.criticité/kWh et 281 c€.criticité/kWh.

Cette analyse de criticité et de mérite respectif aurait naturellement vocation à être complétée d'un bilan complet sur l'ensemble des dimensions environnementales. Par exemple, si les réseaux de chaleur ont une criticité matériaux faible, d'autres considérations, par exemple liées aux pertes en eau, pourraient être prises en compte.

²³ Voir la liste des domaines ciblés Figure 2.

²⁴ Potentiel ultime, taux de mobilisation, potentiel primaire disponible, énergie finale : voir la Figure 26.

²⁵ [ADEME 2021a], [ADEME 2018a], [FSTR 2021b], GRDF, analyses Capgemini.

²⁶ Mix du scénario B en TWh : 29 % nucléaire, 16 % éolien terrestre, 22 % éolien en mer, 20 % solaire, 13 % autres.

Pour les véhicules (Figure 18), l'ordre de mérite favorise la biomasse gazeuse sur l'électricité. Les voitures à moteur thermique fonctionnant avec du gaz issu à 100 % de la méthanisation agricole actuelle ou à 100 % d'un mix de biomasses gazeuses diverses en 2050 incluant de la pyrogazéification (2,6 c€/criticité/km) ont une intensité matière au kilomètre un tiers inférieure aux véhicules thermiques consommant du gaz issu de méthanation²⁷ (4c€/criticité/km), deux fois et demi inférieure à celle des véhicules à hydrogène (6,8 c€/criticité/km), et cinq fois inférieure à celle de véhicules 100 % à batterie électrique (12,8 c€/criticité/km). La différence vient du véhicule lui-même plus que du carburant (partie bleu foncé prédominante par rapport à la partie bleu clair dans le graphe du bas de la Figure 18).

Toutefois, la priorité en mobilité individuelle domicile-travail reste de recourir aux véhicules les plus légers. Un vélo à assistance électrique a une intensité de 0,5 c€/criticité/km, cinq fois plus faible qu'une voiture thermique à biométhane, dix fois plus faible qu'une voiturette de type Citroën AMI et vingt-cinq fois plus faible qu'une voiture électrique qui consomme 12,8 c€/criticité/km.

Par rapport au scénario A, le scénario B envisage un surcroît de production d'énergie via les biomasses de 65 TWh, ce qui contribue de façon significative à réduire la dépendance française aux importations de métaux et de minéraux critiques.

Pour la criticité liée au vivant, l'utilisation des ressources doit tenir compte des usages et être attentive à la biodiversité

En ce qui concerne la filière biomasses, le niveau de criticité multifactorielle des ressources tient moins aux matières inertes qu'à la concurrence des usages pour l'accès aux surfaces agricoles et forestières. Entrent ainsi en compétition l'alimentation humaine (indispensable à la souveraineté alimentaire), l'alimentation animale (pour la production de viande et de laitages), la fertilisation des terres, les puits de carbone, le bois d'œuvre, le bois-industrie et les bio-matières (qui stockent aussi du carbone), la biomasse-énergie liquide pour les carburants aériens, maritimes et terrestres, et enfin les biomasses-énergie solides et gazeuses. Dans ce contexte tendu, où l'on peut chercher à accroître la productivité pour tirer le maximum de chaque parcelle exploitée, il faut également tenir compte de la pression que l'utilisation intensive d'intrants peut exercer sur la biodiversité et les sols.

Pour alléger la tension sur les surfaces disponibles, les déchets constituent un gisement de biomasses digne d'intérêt. Néanmoins, le système de collecte et de traitement de ces déchets devra encore mûrir pour permettre une valorisation en énergie à grande échelle. En outre, les technologies qui permettent de mobiliser les déchets pour produire de l'énergie devront évoluer plus vite : les rendements sont encore insuffisants et certaines d'entre elles comme la pyrogazéification et la gazéification hydrothermale devront faire l'objet d'efforts pour atteindre leur maturité industrielle.



²⁷ Le gaz issu de la méthanation fait partie des solutions électriques car il utilise de l'hydrogène, qui lui-même requiert de l'électricité, qui elle-même requiert des centrales nucléaires, éoliennes, solaires.

Figure 30: Mobilisation des ressources primaires ultimes par les différents usages ; ressources disponibles pour l'énergie solide et gazeuse ; taux d'utilisation selon les scénarios A ou B

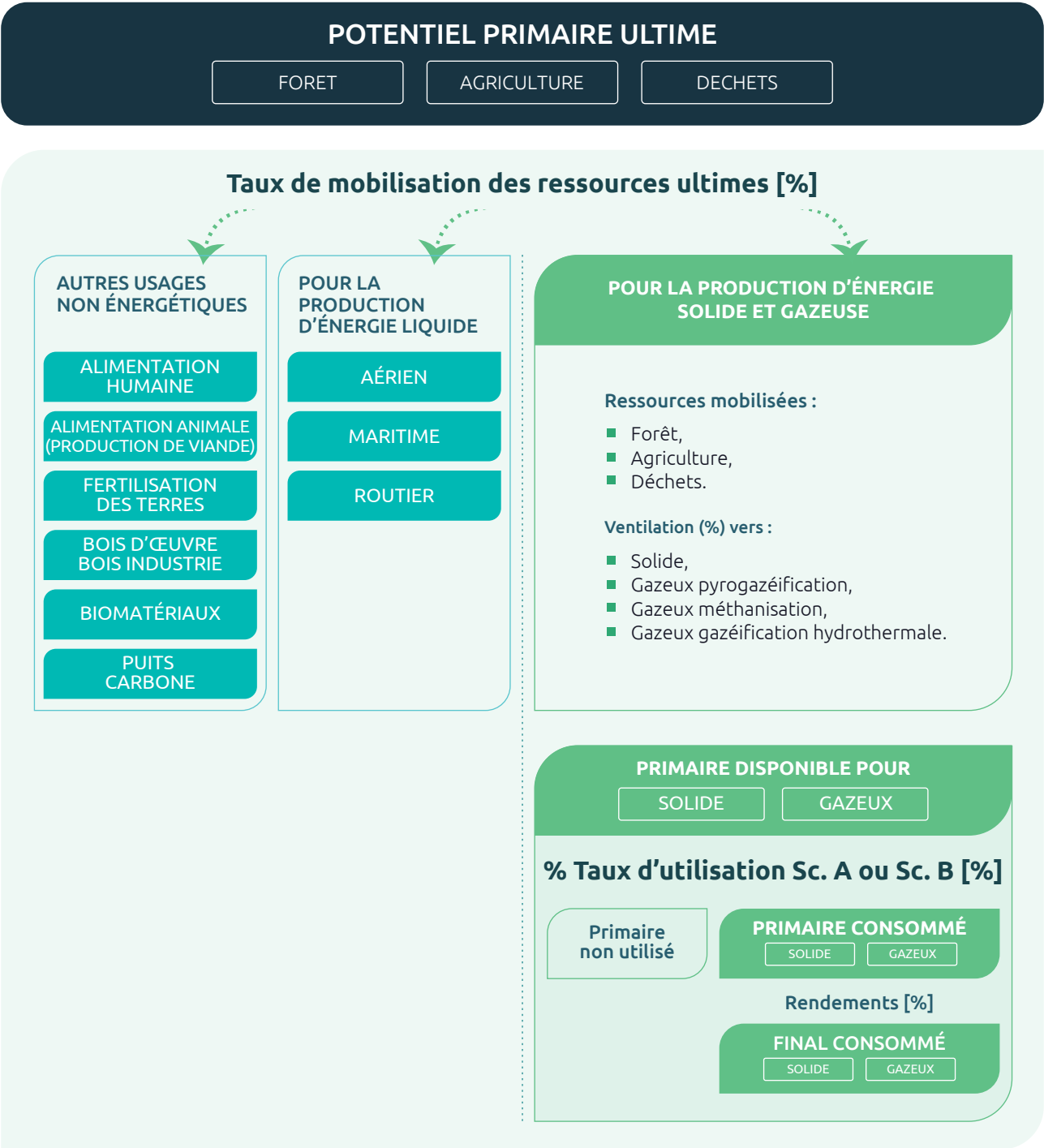
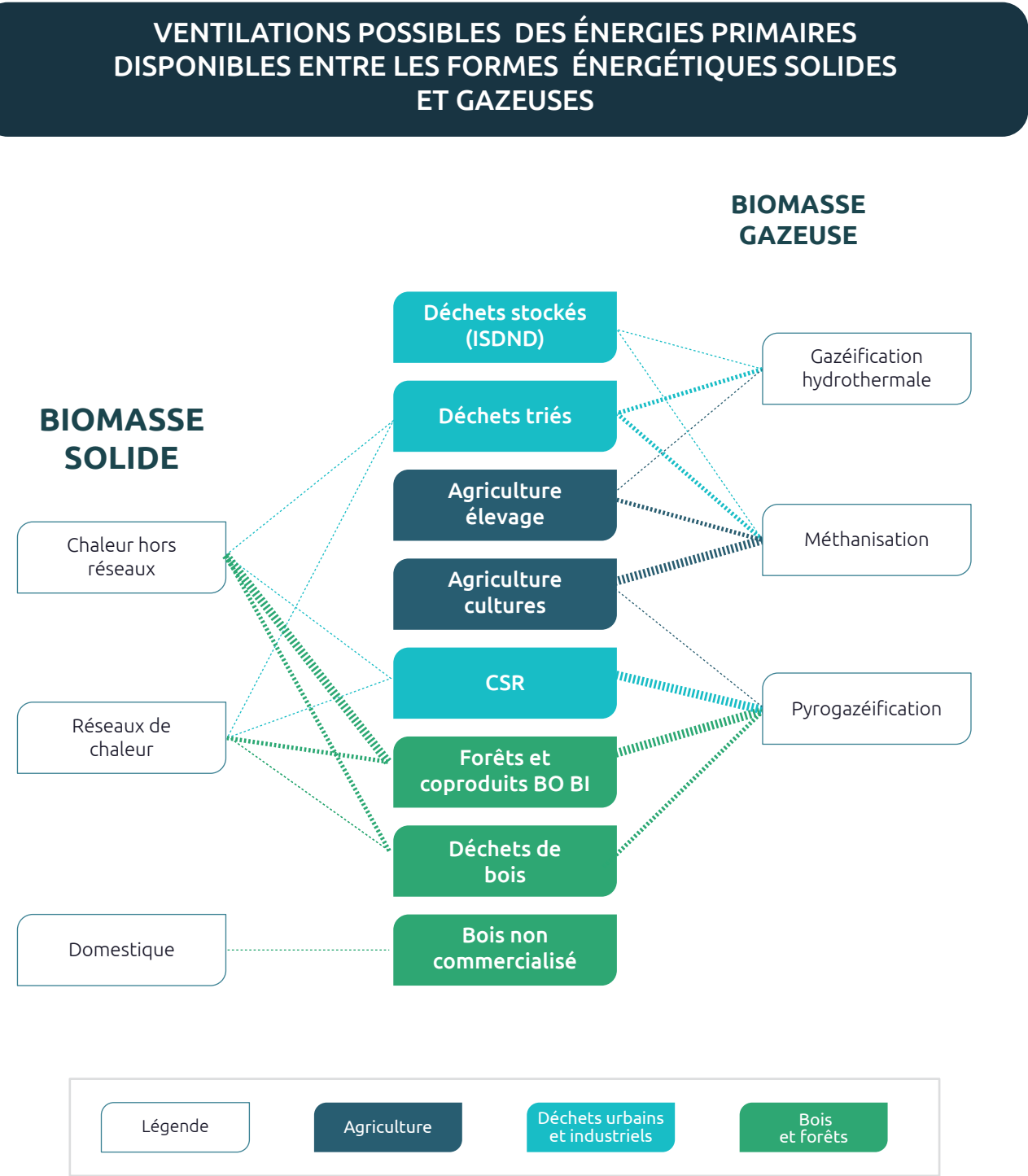


Figure 31: Les ressources issues de la forêt, de l'agriculture et des déchets urbains et industriels sont utilisables de multiples façons pour produire des biomasses solides et gazeuses



Dans ses scénarios Transition(s) 2050²⁸, l'ADEME synthétise un ensemble d'études²⁹ qui distinguent les gisements mobilisés pour les différents usages. Comme le résume la Figure 30, elles attribuent des taux de mobilisation du gisement ultime que doivent se partager les usages en prenant en compte la disponibilité des terres et des déchets, les rendements, l'évolution des habitudes alimentaires³⁰.

La présente étude s'est fondée sur ces résultats en s'inspirant du scénario S3 de Transition(s) 2050³¹. L'augmentation des volumes primaires est rendue possible par la mise en place d'une gestion dynamique de la forêt, de cultures intermédiaires, d'une meilleure exploitation des déchets, d'une réduction de 30 % du régime carné et d'une baisse de 17 % des surfaces agricoles afférentes. De plus, de nouveaux gisements valorisables sont rendus disponibles par les technologies de pyrogazéification et de gazéification hydrothermale. Ces ressources primaires, bois-forêt, agriculture et déchets, sont ensuite ventilées entre les usages en tenant compte de leurs contraintes particulières.

L'ensemble de ces ressources fournit potentiellement 397 TWh PCI d'énergie primaire pour les usages solides et gazeux.

Le Scénario A exploite 76 % de ce potentiel disponible (301 TWh primaires), ce qui permet de produire 253 TWh d'énergie finale. Celle-ci se décompose en 150 TWh de biomasse gazeuse et 103 TWh de biomasse solide pour la chaleur directe et la chaleur en réseaux.

Le Scénario B exploite 96 % du potentiel disponible (382 TWh primaires), ce qui permet de produire 308 TWh d'énergie finale, qui se décompose en 214 TWh de biomasse gazeuse et 94 TWh de biomasse solide pour la chaleur directe et la chaleur en réseaux.

Cette intensification de l'exploitation des ressources biomasses nécessitera des installations et un tissu de savoir-faire qui concourront à la réindustrialisation du pays. Elle devra cependant prêter particulièrement attention à la préservation de la biodiversité.



²⁸ [ADEME 2021a]

²⁹ Etudes de l'ONRB, SOLAGRO, AFTERRES, INRAE, IGN, FCBA, nombre d'entre elles étant commandées par l'ADEME : [ADEME 2015a], [ADEME 2016a], [ADEME 2016b], [ADEME 2017a], [ADEME 2018a], [ADEME 2019a], [ADEME 2019c], [ADEME 2020b], [ADEME 2021c], [FSTR 2021b], [INRAE 2017a], [ONRB 2020a]

³⁰ [ADEME 2020c], [ADEME 2021a]

³¹ [ADEME 2021a]

Figure 32: Ventilations des ressources biomasses primaires disponibles par destination d'usage final solide et gazeux - Taux d'utilisation dans les scénarios A et B

ÉNERGIE PRIMAIRE DISPONIBLE par famille de ressources						
EP disponible, par familles de ressources		TOTAL	Bois-forêt	CSR	Agricole	Autres déchets
2050	TWh PCS	397	165	59	123	51
Actuel	TWh PCS	216	113	0	73	30

SCÉNARIO A - VENTILATION DE L'ÉNERGIE PRIMAIRE DISPONIBLE ET % D'UTILISATION						
Scénario A - ÉNERGIE PRIMAIRE DISPONIBLE, VENTILATION par catégories de destination						
EP disponible, ventilation par catégories de destination		TOTAL	Chaleur & Réseaux de Chaleur	Pyrogazéification	Méthanisation	Gazéification hydrothermale
2050	TWh PCS	397	124	99	137	37
Actuel	TWh PCS	216	121	0	87	8

Scénario A - ÉNERGIE PRIMAIRE CONSOMMEE par chaque destination (pour la production de ces énergies finales, yc. pertes de rendement)						
EP disponible, ventilation par catégories de destination		TOTAL	Chaleur & Réseaux de Chaleur	Pyrogazéification	Méthanisation	Gazéification hydrothermale
2050	TWh PCS	301	103	85	113	0
Actuel	TWh PCS	102	100	0	3	0

Scénario A - % D'UTILISATION de l'énergie primaire disponible						
EP disponible, ventilation par catégories de destination		TOTAL	Chaleur & Réseaux de Chaleur	Pyrogazéification	Méthanisation	Gazéification hydrothermale
2050	TWh PCS	76%	83%	85%	83%	0%
Actuel	TWh PCS	47%	82%	0%	3%	0%

SCÉNARIO B - VENTILATION DE L'ÉNERGIE PRIMAIRE DISPONIBLE ET % D'UTILISATION						
Scénario B - ÉNERGIE PRIMAIRE DISPONIBLE, VENTILATION par catégories de destination						
EP disponible, ventilation par catégories de destination		TOTAL	Chaleur & Réseaux de Chaleur	Pyrogazéification	Méthanisation	Gazéification hydrothermale
2050	TWh PCS	397	108	116	137	37
Actuel	TWh PCS	216	121	0	87	8

Scénario B - ÉNERGIE PRIMAIRE CONSOMMEE par chaque destination (pour la production de ces énergies finales, yc. pertes de rendement)						
EP disponible, ventilation par catégories de destination		TOTAL	Chaleur & Réseaux de Chaleur	Pyrogazéification	Méthanisation	Gazéification hydrothermale
2050	TWh PCS	382	94	115	137	36
Actuel	TWh PCS	102	100	0	3	0

Scénario B - % D'UTILISATION de l'énergie primaire disponible						
EP disponible, ventilation par catégories de destination		TOTAL	Chaleur & Réseaux de Chaleur	Pyrogazéification	Méthanisation	Gazéification hydrothermale
2050	TWh PCS	96%	88%	99%	100%	99%
Actuel	TWh PCS	47%	82%	0%	3%	0%

2.4.3 Quelques leviers pour valoriser les biomasses à grande échelle tout en prêtant attention aux contraintes environnementales

Des leviers spécifiques aux biomasses permettent d'agir sur les quantités de ressources et les surfaces agricoles et forestières nécessaires. Leur mise en œuvre est indispensable pour rendre la SNBC réalisable.

L'augmentation de la consommation de biomasses ne doit pas se faire au détriment d'une gestion raisonnée.

Il est nécessaire de limiter les pressions exercées sur les ressources et sur le vivant et d'encourager la sobriété pour éviter les consommations d'énergie superflues. Les besoins énergétiques finaux peuvent aussi être réduits grâce à la rénovation et la construction neuve bas carbone.

Pour éviter des transports qui en dégraderaient le rendement et le bilan carbone, les ressources biomasses doivent aussi être valorisées localement. Chaque voie de valorisation doit donc être choisie en fonction de la nature des gisements disponibles à proximité des usages.

En parallèle, la protection et la gestion raisonnée des ressources biomasses est nécessaire pour sauvegarder des puits de carbone naturels, qui sont aussi, souvent, des réservoirs de biodiversité. Il s'agit pour cela d'équilibrer la valorisation du bois en énergie et en matière tout en protégeant les forêts des grands incendies.

Les avancées techniques réduisent les besoins en ressources grâce à l'amélioration des rendements et la diversification des gisements mobilisés.

La généralisation des cultures intermédiaires, intercalées entre deux parcelles de culture alimentaire, est importante pour optimiser l'utilisation de la surface agricole utile sans obérer la production alimentaire. La mise en place de ces cultures doit cependant se faire dans des conditions contrôlées, avec a minima une analyse des conditions pédo-climatiques et du rendement.

En outre, flécher l'allocation du gisement de déchets vers les technologies les plus pertinentes contribue à réduire la pression sur les ressources confrontées aux concurrences d'usage.

La valorisation des ressources biomasses et des déchets permet de maximiser le stock de matière disponible.

Pour les ressources biomasses, un point important réside dans la consolidation de la filière de collecte et de traitement des déchets. D'une part, le tri à la source des biodéchets doit être maximisé. D'autre part, une partie des effluents d'élevage, des résidus de culture, des cultures intermédiaires et du digestat produit par méthanisation doit être récupérée et intégrée rapidement dans un circuit de valorisation pour éviter de perdre son potentiel méthanogène.

Une augmentation du taux de valorisation des déchets de bois au sein des unités de pyrogazéification et des chaufferies permet de maximiser le stock disponible.

Enfin, l'accélération du développement des technologies de gazéification hydrothermale et de pyrogazéification à base de déchets constituent des opportunités pour élargir la gamme des biomasses utilisables. En particulier, le traitement des biomasses liquides, pour lesquelles les contraintes réglementaires vont se renforcer en particulier sur l'épandage, reste un angle mort de la plupart des scénarios récents.

Une meilleure gestion des ressources en amont permet de pérenniser la filière.

En priorité, le développement du digital dans le secteur de la biomasse permet d'améliorer les rendements et ainsi de réduire les contraintes de surface. Par exemple, la cartographie numérique est essentielle pour développer les pratiques de l'agriculture de précision et améliorer la gestion des forêts afin d'augmenter les rendements.

Concernant les déchets, pour assurer leur disponibilité en quantités suffisantes, il est nécessaire de faciliter les échanges et le traitement au niveau local.

Il est particulièrement important de développer la filière nationale du bois en donnant la priorité au marché intérieur, en limitant les exportations et en déployant une politique d'investissement ambitieuse. Exportant 32 % de ses récoltes, la filière bois française est déjà sous tension alors que l'énergie biomasse reste encore peu développée. Il est nécessaire d'investir dans le développement d'une sylviculture dynamique et de mutualiser les savoir-faire en matière de gestion forestière, conditions sine qua non pour augmenter le gisement disponible et atteindre les objectifs fixés par la SNBC.

Pour finir, des réglementations appropriées permettraient de soutenir la valorisation énergétique des biomasses grâce à la mise en place de mécanismes extra-budgétaires en plus du tarif d'achat. Il est également important d'augmenter la part de l'utilisation du bois dans la construction et la rénovation par la voie législative.

2.5 LA CONSTRUCTION : LES VOLUMES PÈSENT SUR LA FILIÈRE, MAIS PEUVENT ÊTRE DRASTIQUEMENT RÉDUITS AVEC UNE APPROCHE CIRCULAIRE

En plus du secteur du bâtiment, la filière de la construction sert les deux filières électrification et biomasses. D'une part, parce que la construction neuve et la rénovation des bâtiments permettent de diminuer les besoins énergétiques des secteurs résidentiels et tertiaires. D'autre part, parce que le BTP en génie civil est mis à contribution pour construire les infrastructures nécessaires (installations industrielles, centrales de production, réseaux de chaleur, etc.). La criticité de la filière construction s'établit à 2,3 (Figure 15) en raison de l'ampleur des tonnages concernés à la fois pour la construction et pour la déconstruction, dont les déchets exercent une pression localisée autour des grandes aires urbaines.

2.5.1 La filière contribue à améliorer l'efficacité énergétique du parc bâti et à construire les infrastructures d'énergie décarbonée

Les bâtiments résidentiels et tertiaires consomment 47 %³² de l'énergie finale en France. Leur décarbonation constitue un enjeu majeur de la SNBC. La construction neuve et la rénovation sont indispensables pour faire baisser les consommations d'énergie. 386 400 logements neufs ont été construits en 2018. Le nombre de construction neuve n'a pas forcément vocation à augmenter, mais la performance énergétique des bâtiments existants doit être améliorée pour atteindre les objectifs de décarbonation. Dans les scénarios A et B, les nombres de constructions neuves prises en compte sur la période 2020-2050 sont respectivement de 320 000 et 175 000 par an pour les résidences principales uniquement. En moyenne, sur la même période, le nombre de rénovations performantes est estimé à 400 000 par an dans le Scénario A et 660 000 par an dans le Scénario B, ce qui correspond respectivement à environ un doublement et un triplement du rythme actuel (voir les hypothèses de chacun des scénarios Figure 37).

Le secteur du BTP est également impliqué dans le génie civil des infrastructures d'énergie décarbonée, appelées à remplacer les infrastructures dédiées aux énergies fossiles. D'ici 2050, les capacités installées dans le domaine des réseaux de chaleur devraient doubler, voire tripler (22 TWh actuellement), les capacités de production de biométhane être multipliées par trente à quarante (3 TWh actuellement), les puissances éoliennes et solaires décupler (37 TWh actuellement), sans compter les nouvelles tranches nucléaires, la déconstruction des tranches arrivées en fin de vie, et l'adaptation des réseaux électriques pour accueillir ces nouvelles installations³³.

2.5.2 La criticité tient à la pression exercée par l'ampleur des volumes autour des centres urbains

Le bâtiment comme le génie civil nécessitent du béton et de l'acier en grandes quantités. Cette étude s'est restreinte à ces deux ressources fondamentales même si la filière en requiert beaucoup d'autres (bois, plâtre, terres cuites, plastiques...). Au total, la construction neuve résidentielle et tertiaire nécessite actuellement 53,2 millions de tonnes de matériaux chaque année³⁴.

Pourtant, l'enjeu de criticité ne se situe pas au niveau de la disponibilité du béton et de l'acier. Pour le premier, la France dispose des carrières suffisantes pour produire les granulats nécessaires. Pour le second, les réserves de fer sont abondantes dans le monde, aucun monopole ne met en péril la chaîne d'approvisionnement et 40 %³⁵ de la production d'acier provient déjà du recyclage.

L'enjeu principal se situe davantage au niveau de l'accessibilité en béton. En effet, les granulats sont parfois peu accessibles en raison de conflits locaux concernant l'implantation des carrières. Avec l'augmentation des besoins, certains chantiers pourraient se retrouver sous tension en raison de pénuries localisées de béton.

La déconstruction génère en outre des quantités considérables de déchets (17 Mt par an en 2020, Figure 13) qui sont encore peu valorisés. L'ampleur des tonnages concernés, qu'il faudra évacuer et entreposer, fera peser une pression importante autour des grandes zones urbaines.

³² [ADEME 2021a], *Consommation d'énergie finale en 2015, Résidentiel 451 TWh PCI, Tertiaire 735 TWh PCI*

³³ [ADEME 2021a], [RTE 2021a], [MTE 2020a], *analyse et hypothèses pour les scénarios A et B par Capgemini*.

³⁴ [ADEME 2021a], *en 2015*

³⁵ Sénat, *mission d'information "Les enjeux de la filière sidérurgique dans la France du XXI^e siècle : opportunité de croissance et de développement"*

Par ailleurs, la construction produit des externalités négatives qu'il faudra gérer. Elle artificialise les terres, ce qui est préjudiciable à la biodiversité et aux puits de carbone naturels (sol et végétation). 75 % de l'artificialisation des sols provient ainsi de la construction de logements. La construction est également une activité polluante : à elle seule, la production des matériaux et des équipements employés sur les chantiers émettent 65 % des GES liés au cycle de vie d'un bâtiment neuf³⁶.

La rénovation, beaucoup plus sobre en ressources que la construction neuve

Enfin, la rénovation apparaît comme une voie essentielle pour décarboner le bâtiment. Alternative plus sobre, elle consomme quarante à cent fois moins de ressources par m² que la construction neuve³⁷. En euros.criticité par m², les ratios sont de 20 à 40 fois en faveur de la rénovation sur les ressources béton, acier et aluminium (Figure 20). La rénovation mobilise en outre des ressources de natures différentes. Elle consomme moins de béton et d'acier, double les quantités d'isolants biosourcés et mobilise plus de bois que la construction. Enfin, elle génère dix fois moins de déchets que la déconstruction par unité de surface.

2.5.3 Des choix stratégiques en faveur de la rénovation et du recyclage permettraient de diviser par trois les tonnages nets

Les leviers examinés traitent du bâtiment sans s'y limiter. Ils concernent aussi le béton et l'acier utilisés dans le génie civil, en particulier dans les installations nucléaires et biomasses, les parcs renouvelables et les réseaux de chaleur et électriques.



³⁶ [ADEME 2021a], ADEME, Transition(s) 2050, Novembre 2021

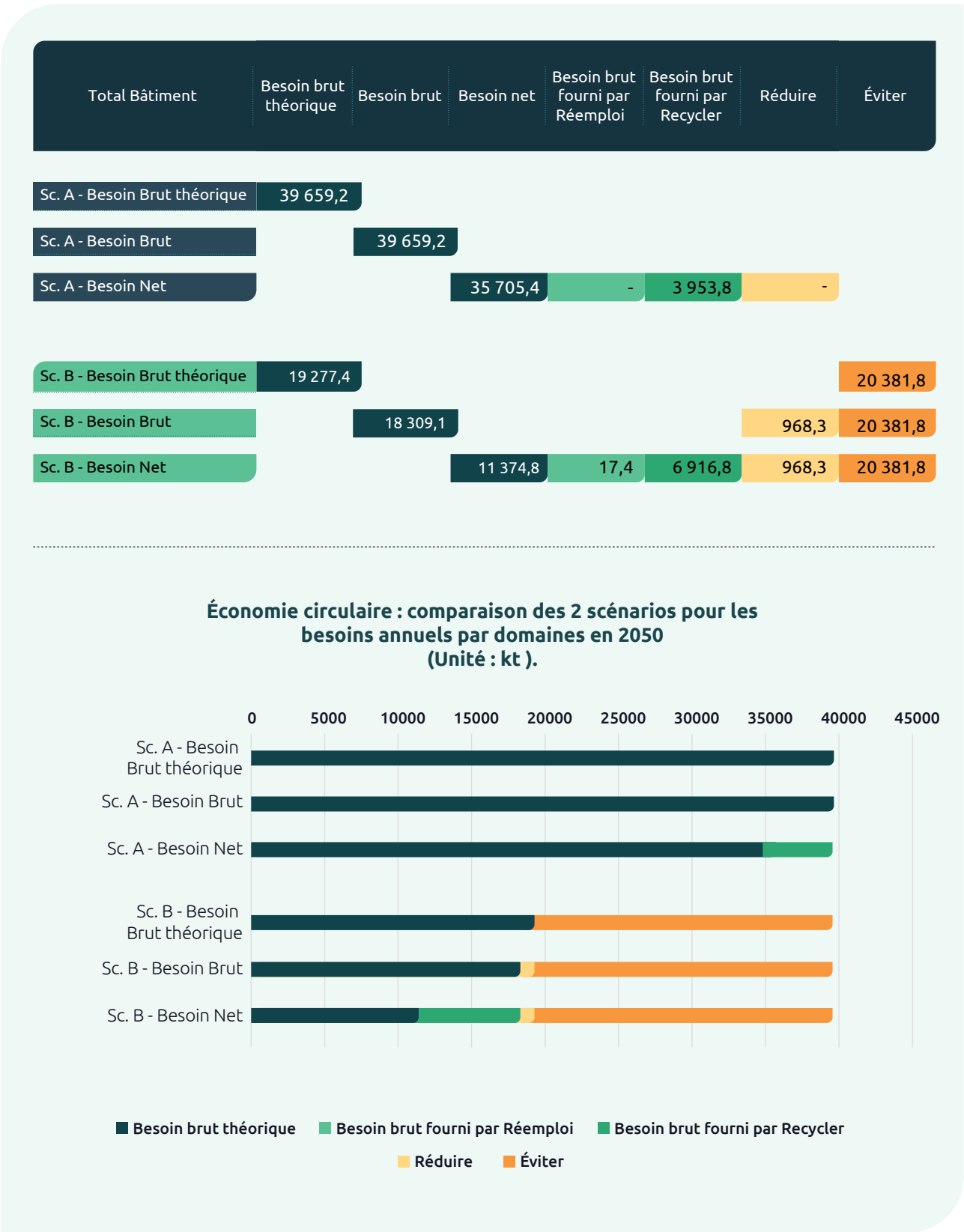
³⁷ Source [SURFER 2020a], analyse Capgemini. Ratios utilisés dans cette étude : 41 fois en logement collectif, 95 fois en logement individuel, 104 fois en tertiaire sur l'ensemble béton, acier, aluminium.

Figure 33: Maturité des leviers circulaires dans la filière de la construction et priorité des efforts

		Domaines		
		Moyenne des scores	Bâtiments - neuf	Bâtiments - rénovation
Maturité actuelle 2020	Eviter	2.0	2	na
	Réduire	1.5	2	1
	Réemployer	2.0	2	2
	Recycler	2.0	3	1
	Ecoconception	1.5	2	1
	Organisation Filières et territoriale	2.5	3	2
	Digital	2.0	2	2
	Recherche Développement et innovation	2.5	3	2
	Réglementaire et financier	3.0	3	3
	Maturité actuelle globale	2.1	2.4	1.8
Priorité des efforts à faire 2020-2050	Eviter	3.0	5	1
	Réduire	2.5	3	2
	Réemployer	4.0	4	4
	Recycler	5.0	5	5
	Ecoconception	5.0	5	5
	Organisation Filières et territoriale	5.0	5	5
	Digital	3.0	3	3
	Recherche Développement et innovation	2.0	2	2
	Réglementaire et financier	3.0	3	3
	Priorité d'efforts globale	3.6	3.9	3.3

Pour réduire fortement la criticité dans le secteur de la construction, les efforts sont à fournir particulièrement sur les leviers d'action circulaire Éviter, Recycler, Écoconception et Organisation filière et territoriale.

Figure 34: Chiffres clés des domaines de la construction neuve et de la rénovation (kt par an en 2050)



Des choix stratégiques forts permettraient de diviser par deux les tonnages bruts (20,3 Mt évités) et de recentrer le secteur de la construction vers un modèle équilibré entre neuf et rénovation

Les scénarios étudiés établissent la quantité de résidences principales qui seront nécessaires étant donné l'accroissement prévu de la population à loger, estimée 69,7 millions d'habitants en 2050³⁸.

Un paramètre important concerne le nombre de logements, qui dépend en bonne partie du nombre moyen de personnes par ménage. Ce chiffre est passé de 2,6 en 1990 à 2,2 en 2016³⁹, ce qui a fortement contribué à augmenter le besoin en nombre de logements. Les scénarios A et B reprennent les hypothèses de Transition(s) 2050, soit 2,02 dans le Scénario A et 2,12 dans le Scénario B à l'horizon 2050. Cette différence, en apparence modeste, permettrait d'éviter la construction d'1,6 million logements neufs d'ici à 2050.

La réversibilité potentielle des bâtiments tertiaires en bâtiments d'habitation concourt aussi à une plus grande souplesse du parc entre usages tertiaire et résidentiel, et donc à éviter d'autres constructions inutiles.

Un autre gain important peut venir de la transformation d'une partie des logements vacants et des résidences secondaires en résidences principales, accompagné d'une rénovation performante. Le Scénario B comprend un quart de logement vacants et résidences secondaires de moins que dans le Scénario A, ce qui permettrait d'éviter la construction d'1,7 million logements supplémentaires d'ici à 2050.

Les rénovations complètes et performantes devront toucher une plus grande part du parc existant pour compenser le moindre nombre de constructions neuves et aboutir à une performance énergétique moyenne du parc équivalente. Dans le scénario A on construit 9,6 millions de logements neufs et on rénove de façon approfondie 11,8 millions de logements, pour un total de 21,7 millions de logements performants. Dans le scénario B on construit moins en neuf, 5,2 millions de logements, mais on rénove plus, 19,8 millions de logements, pour un total de 25 millions de logements performants. Les rénovations, nécessitent, comme on l'a vu plus haut, 40 à 100 fois moins de ressources en béton, acier et aluminium.

Au total, ce sont plus de 20 millions de tonnes de ressources, soit la moitié des tonnages, que permettraient d'éviter des choix stratégiques forts en faveur de la rénovation plutôt que de la construction neuve.

La production de déchets est réduite de 2,9 millions de tonnes (béton seul). Le moindre besoin de construction neuve réduit mécaniquement le besoin de foncier supplémentaire et donc l'artificialisation des sols (gain non modélisé), surtout si l'on s'attache à construire en priorité sur les friches commerciales et industrielles vieillissantes (recyclage foncier).

Pour actionner pleinement ce levier et aider le secteur de la construction à opérer sa transition du neuf vers la rénovation, la réglementation ainsi que les aides et les incitations publiques ont un rôle déterminant à jouer.

L'industrialisation du recyclage des déchets de déconstruction permet un gain majeur de 7 millions de tonnes de matériaux par an (levier Recycler)

Le recyclage des matériaux pourrait constituer une nouvelle activité industrielle à part entière – et à fort potentiel – pour le secteur de la construction. Pour cela, un accent particulier devrait être mis sur l'organisation de plateformes et de chaînes logistiques, mais aussi – et surtout – sur le point de départ du processus avec le passage à l'échelle de la dépose sélective des matériaux au moment de la déconstruction. Ce flux de recyclage, évalué à 7 millions de tonnes annuelles de béton et d'acier, permettrait de diminuer d'autant les besoins en matières premières vierges (sables, granulats, auxquels il faudrait ajouter le verre, les terres cuites, le bois, etc. que nous ne comptabilisons pas ici). Il aurait aussi pour conséquence de soulager les surfaces naturelles dédiées au stockage de déchets inertes.

Le recyclage vertueux peut aussi toucher le génie civil des infrastructures énergétiques. Dans le domaine du nucléaire, les scénarios A et B correspondent au scénario N1 de RTE. Un volume important de matériaux sera généré par ces déconstructions. Le scénario N1 prévoit la déconstruction de 39 GW et la construction de 13 GW. Cela explique les chiffres excédentaires dans le Scénario B : les volumes potentiellement recyclables sont supérieurs aux volumes de besoin. Le béton, l'acier et le cuivre non irradiés (la majorité en volumes) pourraient être triés, puis recyclés en boucle courte sur place pour construire les nouvelles tranches.

Le réemploi sans recyclage n'aurait en revanche qu'un impact marginal (moins de 1 % des besoins bruts dans le Scénario B).

³⁸ [ADEME 2021a].

³⁹ [ADEME 2021a]

La technologie et l'innovation ouvrent des marges d'amélioration non négligeables (levier Réduire)

Au total, le Scénario B chiffre à 968,3 kt annuelles les volumes de ressources qui pourraient être évités grâce aux progrès techniques, soit 5,3 % des besoins nets. Les avancées dans la modélisation numérique peuvent aider les bureaux d'études à optimiser les dimensionnements et à réduire les quantités de ressources nécessaires. L'utilisation de matériaux régénératifs biosourcés (structure bois, matériaux pour isolants...) permettrait de développer des alternatives tout en limitant les dommages sur l'environnement et en contribuant à séquestrer du carbone. L'évolution des normes au fur et à mesure des progrès favorise ensuite leur diffusion et en multiplie l'impact.

L'écoconception sous contrainte de ressources est une priorité pour concrétiser les gains potentiels.

L'écoconception des bâtiments et des infrastructures est une approche incontournable pour en minimiser l'impact sur l'environnement sur l'intégralité de leur cycle de vie. Elle permet d'augmenter la durée de vie des ouvrages et des installations en améliorant leur transformabilité et leur réversibilité, par exemple de bâtiments tertiaires en bâtiments résidentiels.

Faciliter la déconstruction sélective des ouvrages en fin de vie est également au cœur de l'écoconception afin de pouvoir en valoriser aisément et à moindre coût les éléments et les matériaux (réemploi, réutilisation et recyclage). Les bâtiments et les installations doivent être conçus avec des matériaux facilement démontables et les méthodes d'assemblage doivent permettre un démantèlement soigneux, puis un tri et une collecte efficaces.

L'écoconception prendra aussi en compte les questions de performance et de qualité des matériaux lors de leur mise en œuvre initiale, mais aussi à l'occasion de leur deuxième vie dans le cadre du réemploi ou du recyclage. En effet, les équipements et le bâtiment doivent pouvoir être assurés, ce qui signifie que les matériaux doivent répondre aux exigences de l'usage et aux normes en vigueur. Intégrer les assureurs dans les évolutions de l'écoconception est donc important, à la fois pour accompagner la fiabilisation des nouvelles techniques constructives et pour le contrôle de la qualité des matières recyclées.

Les volumes concernés imposent d'organiser soigneusement les filières au niveau local.

Développer le maillage des points de collecte, de tri et de recyclage des déchets du bâtiment est indispensable pour optimiser les flux de matière au niveau local. L'enjeu est de minimiser les transports afin d'en diminuer les coûts (pour rendre les granulats recyclés compétitifs) et d'en réduire simultanément l'impact environnemental.

Des organismes coordonnateurs chargés de la mise en place d'outils et d'un vocabulaire de référence commun pourraient être créés pour mettre en relation les acteurs. Cela accélérerait la création du marché en favorisant la rencontre entre l'offre et la demande au gré des chantiers de construction et de déconstruction en cours ou programmés sur le territoire.

L'optimisation du foncier joue à plusieurs niveaux. On a vu que construire moins et rénover plus permettait d'abaisser la pression sur le foncier, mais libérer du foncier sera également nécessaire à la mise en place des plateformes logistiques pour les matières déposées et recyclées à proximité des centres villes et des chantiers.

Figure 35: Leviers circulaires à activer : illustration dans les domaines du bâtiment



LEVIERS MOBILISÉS

Éviter

- Favoriser la rénovation à la construction neuve pour diminuer le besoin en ressources et les déchets générés

Réduire

- Développer l'usage de matériaux régénératifs biosourcés, moins dommageables pour l'environnement
- Optimiser le besoin en matériaux grâce à la modélisation

Réemployer

- Augmenter la durée de vie des bâtiments en améliorant leur transformabilité et leur réversibilité
- Concevoir les bâtiments de sorte à faciliter la démontabilité des matériaux lors de la rénovation
- Aménager le chantier pour réemployer le béton concassé issu de la déconstruction sur le même site

Recycler

- Construire sur des friches industrielles et commerciales vieillissantes pour prévenir l'artificialisation des sols
- Pratiquer la déconstruction sélective pour faciliter le tri et donc le recyclage de l'ensemble des ressources
- Développer un écosystème de valorisation au niveau local pour diminuer les émissions liées au transport des déchets

Plusieurs leviers sont à mobiliser pour réduire les quantités de déchets générées par la construction et diminuer la pression aux alentours des villes provoquée par la magnitude des tonnages concernés.



3 LES LEVIERS TRANSVERSES DE LA MISE EN PLACE DE LA CIRCULARITÉ

Des grands enseignements développés dans la partie précédente, nous pouvons déduire des préconisations globales pour faire de l'économie circulaire un puissant moteur de la décarbonation de notre économie. Ces préconisations portent sur cinq leviers transverses : la réglementation, les financements, l'écoconception, l'organisation territoriale, le numérique et l'innovation.

3.1 ARTICULER LES RÈGLEMENTATIONS EN FAVEUR DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE ET DE LA DÉCARBONATION

Il est primordial de faire converger les stratégies d'optimisation de l'utilisation des ressources et de lutte contre le réchauffement climatique.

L'optimisation de l'utilisation des ressources et la lutte contre le réchauffement climatique procèdent d'une même volonté de réduire l'impact des activités humaines sur l'environnement. Pourtant, s'ils ne sont pas envisagés conjointement et alignés, ces deux objectifs peuvent entrer en contradiction. Ainsi, une politique d'économie circulaire conçue au seul prisme des ressources peut contribuer à augmenter les émissions carbone, par exemple via le recyclage de matières à forte demande énergétique, le transport sur de longues distances de matières en vue de leur traitement ou des incinérations irraisonnées. Inversement, une politique conçue sous le seul angle du carbone risque de négliger d'autres enjeux environnementaux tout aussi préoccupants : raréfaction des ressources, érosion de la biodiversité, pollutions.... Malheureusement, ces deux sujets, à la fois interdépendants et complémentaires, sont encore trop souvent traités de manière cloisonnée dans les politiques publiques.

La prise en compte conjointe des aspects ressources et décarbonation doit se faire dès l'élaboration des prochains travaux législatifs et réglementaires.

Introduite par la loi n°2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat, l'adoption avant le 1er juillet 2023 d'une loi de programmation quinquennale sur l'énergie et le climat (LPEC) précédera pour la première fois la révision de la Programmation pour l'Énergie (PPE) (2024-2033) et de la SNBC (au plus tard le 1er juillet 2024).

Par cette loi, les députés fixeront les grands objectifs de ces deux stratégies (PPE & SNBC) concernant :

- La réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- La réduction de la consommation énergétique finale et de la consommation énergétique primaire fossile, pour chaque type d'énergie fossile ;
- Le développement des énergies renouvelables pour l'électricité, la chaleur, le carburant et le gaz ;
- La diversification du mix de production d'électricité ;
- La rénovation énergétique dans le secteur du bâtiment ;
- L'autonomie énergétique des départements d'outre-mer.

La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) fixera ensuite plus précisément la trajectoire pour le mix énergétique, détaillant les priorités d'action en matière d'énergie pour les dix années suivantes, partagées en deux périodes de cinq ans. En effet, la PPE est actualisée tous les cinq ans, la deuxième période de cinq ans étant révisée et une période subséquente de cinq ans étant ajoutée. Des priorités d'action y sont détaillées par filière (éolien, réseaux de chaleur, photovoltaïque, biogaz...). La première PPE a été approuvée en 2016 et révisée en 2018, avant de l'être tous les cinq ans. Ainsi, la troisième PPE (2024-2033) devra être compatible avec la loi de programmation sur l'énergie et le climat, et promulguée par décret dans les douze mois suivant son adoption.

La Stratégie nationale bas carbone (SNBC), quant à elle, est issue des engagements européens (Paquet Énergie-Climat ; Règlement n°525/2013 du 21 mai 2013 relatif à un mécanisme pour la surveillance et la déclaration des émissions de gaz à effet de serre) qui enjoignent aux Etats d'élaborer des stratégies de développement à faible intensité de carbone (voir l'encadré « La SNBC, fille d'un cadre européen ambitieux »). La loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) avait ainsi retranscrit cette exigence et la première SNBC avait été adoptée en 2015 (fixant l'objectif « facteur 4 », soit la réduction de 75 % des émissions en 2050 par rapport à 1990), puis révisée en 2018-2019 (objectif réhaussé de neutralité carbone en 2050). Attendue avant juillet 2024, la troisième SNBC devra définir les grandes orientations et les mesures à mettre en œuvre par secteur (transports, bâtiment, agriculture, industrie...) pour atteindre les objectifs nationaux, et fixer les budgets-carbone (plafonds quinquennaux d'émissions de gaz à effet de serre à ne pas dépasser).

La stratégie française pour l'énergie et le climat (SFEC) devra intégrer les contraintes de ressources pour entrer en résonance avec d'autres stratégies nationales centrées sur l'économie circulaire. Ces textes, tels que la FREC ou la loi AGECL, favorisant une meilleure utilisation des ressources concourent également à la décarbonation de notre économie.

Les objectifs de réduction des déchets fixés par la loi AGECL ont ainsi été fixés en vue d'atteindre l'objectif de neutralité carbone que s'est donnée la France à l'horizon 2050. Les dispositions en faveur du développement de la réparation (fonds réparation, indice de réparabilité/durabilité, allongement de la durée de garantie légale, renforcement de la disponibilité des pièces détachées, lutte contre l'obsolescence logicielle) et du réemploi (interdiction de destruction des invendus, fonds réemploi) concourent à l'allongement de la durée de vie des produits, induisant une meilleure utilisation des ressources et une diminution des émissions de gaz à effet de serre.

La commande publique est également un des leviers exploités par les dispositions existantes, avec l'obligation pour les acheteurs publics d'acquérir des biens issus du réemploi et du recyclage dans des proportions définies par décret (décret n°2021-254 du 9 mars 2021) et de prendre en compte les considérations environnementales dans tous les marchés publics d'ici 2025 (Loi Climat & résilience et Plan national des achats durables). Au moins 25 % des constructions neuves et des rénovations lourdes de la commande publique devront, par exemple, utiliser des

matériaux biosourcés ou bas carbone à partir de 2030, et la réglementation environnementale RE2020 prévoit une valeur nulle pour les composants issus du réemploi dans le calcul de l'impact carbone du bâtiment.

La loi AGECL prévoit une réforme de la responsabilité élargie du producteur (REP) avec une extension des flux de produits concernés, du spectre des acteurs visés et des objectifs même de ce dispositif : les producteurs ne sont plus seulement responsables de la fin de vie de leurs produits, mais doivent contribuer à prévenir la production de déchets, à éco-concevoir leurs produits et à favoriser leur réemploi, toujours dans une optique d'optimisation de l'utilisation des ressources et de réduction de la consommation d'énergie et des émissions de GES.

Les députés ont adopté la fin de la mise sur le marché d'emballages en plastique à usage unique d'ici 2040, avec des interdictions progressives dès 2021 et un objectif de tendre vers 100 % de plastique recyclé en 2025. Les nouvelles dispositions visent également à ce que le consommateur soit mieux informé de l'impact environnemental des produits (« planet score » calculé sur l'incorporation de matières recyclées, la réparabilité, les émissions de gaz à effet de serre, etc., information sur les bonus-malus environnementaux) afin qu'il puisse faire des choix plus éclairés.

Les collectivités devront mettre en place d'ici la fin de l'année 2023 une collecte séparée des déchets organiques (dits « biodéchets ») de manière à réduire l'incinération et le stockage de ces déchets et d'en favoriser le retour au sol ou la méthanisation pour produire des engrais naturels et de l'énergie.

Au total, beaucoup de dispositifs concourent – ou concourront bientôt – à la décarbonation, à condition toutefois d'en assurer le suivi et de veiller à ce qu'ils soient appliqués dans le respect de leurs ambitions initiales. Investir dans les filières industrielles apparaît également comme une nécessité face à l'objectif grandissant de sécuriser les chaînes d'approvisionnement.

Inextricablement liées par nature, les différentes politiques énergétiques, d'économie circulaire et de lutte contre le réchauffement climatique doivent donc l'être tout autant dans leurs objectifs que dans les moyens à déployer pour se renforcer mutuellement et accélérer leurs effets respectifs.



3.2 FLÉCHER LES FINANCEMENTS VERS LES PROJETS VERTUEUX DU POINT DE VUE DES RESSOURCES

3.2.1 *Impact investing* : favoriser l'investissement dans les projets à circularité forte

Les fonds d'investissement, les directeurs financiers des groupes privés, les banques et la puissance publique jouent un rôle déterminant pour l'adoption des bonnes pratiques de l'économie circulaire, du fait du pouvoir d'influence de leurs choix d'investissement. On parle d'« *impact investing* ».

Plutôt que de continuer à financer l'économie linéaire, ils doivent accorder leur préférence et de meilleures conditions financières à des projets appliquant les principes de l'économie circulaire dans une perspective de mieux-disant environnemental. Les critères de soutenabilité intégreraient alors ceux de circularité, depuis la construction initiale du projet jusqu'à sa fin de vie.

Le financement d'un projet doit être conditionné à plusieurs exigences de circularité

Des questions primordiales sont à poser dès l'élaboration du projet : les choix stratégiques évitent-ils la consommation inutile de matériaux ? Le design technique du projet permet-il de réduire les quantités de matières sensibles utilisées ? Le projet recourt-il en priorité – quand c'est techniquement possible – à des matières issues de l'économie circulaire (réemploi, réutilisation, recyclage) ? La conception technique et le modèle d'affaires prévoient-ils des économies ou une création de valeur grâce au réemploi de composants ? La conception technique et le modèle d'affaires favorisent-ils l'usage du produit plutôt que sa possession ?

D'autres points sont à évaluer concernant plus spécifiquement la phase d'utilisation du produit/service/infrastructure/équipement, puis sa fin de vie : les choix stratégiques évitent-ils la production de rejets, déchets et nuisances inutiles ? La conception technique réduit-elle les quantités de déchets ? La conception facilite-t-elle la réparation in situ, le démontage et la valorisation ?

À travers ce questionnement, l'investisseur peut évaluer si le projet qu'il envisage de financer contribue au pivot du modèle économique, industriel et commercial de l'entreprise vers l'économie circulaire, dans une vision holistique qui considère tout le cycle de vie du produit ou du service.

La taxonomie verte, un outil européen pour orienter les investissements vers l'économie circulaire

Dans cette perspective, la Commission européenne a élaboré en 2018 un plan d'action sur la finance durable, où figure l'outil de la taxonomie verte. Ce système de classification, à destination des investisseurs, entreprises, porteurs ou promoteurs de projets, établit une liste d'activités économiques considérées comme écologiquement durables. Le règlement du 18 juin 2020 a pour but de standardiser les activités vertes sur lesquelles l'investissement devrait se porter en priorité. Ce nouveau cadre fixe plusieurs objectifs permettant à une activité d'être qualifiée de durable si elle contribue à au moins l'un d'entre eux sans nuire significativement à aucun des autres. L'économie circulaire constitue un des piliers de cette taxonomie verte puisqu'un des objectifs lui est spécifiquement consacré (« Participer à la transition vers une économie circulaire »).

3.2.2 Mobiliser les outils financiers de la puissance publique pour soutenir des filières identifiées

Toutefois, dans la plupart des cas, les flux circulaires sont encore aujourd'hui moins compétitifs que les approches conventionnelles. L'Etat et les collectivités ont un rôle essentiel à jouer pour compenser les écarts de prix et soutenir ainsi le développement de l'économie circulaire. Pour cela, ils ont à leur disposition tout un éventail de solutions, dans les limites de leurs prérogatives : les subventions à l'investissement, l'incorporation de critères circulaires dans les appels d'offres publics (par exemple, dans les appels d'offre de la CRE pour l'éolien en mer), une politique d'achat public responsable, des tarifs de rachat différenciés, les certificats d'économie d'énergie (CEE), les taxes, etc.

Un accompagnement financier des filières de l'économie circulaire est, dans un premier temps, nécessaire pour les faire émerger. La poursuite d'aides adaptées permettra peu à peu de stabiliser leurs modèles économiques jusqu'à ce qu'elles atteignent une taille critique et qu'elles deviennent suffisamment compétitives pour pouvoir voler de leurs propres ailes.

Les investissements doivent être orientés en priorité vers les trois filières de l'étude

Nous avons vu que les trois filières de notre étude – électrification, biomasses, construction – joueront un rôle décisif dans l'objectif de décarbonation et qu'elles peuvent toutes trois tirer un bénéfice considérable de l'économie circulaire. Les pouvoirs publics doivent donc particulièrement porter leurs efforts d'investissements sur les leviers de circularité propres à ces trois filières.

Dans la construction, il faudra développer des

plateformes de recyclage et de réemploi. En parallèle, des investissements seront à fournir au niveau de la chaîne logistique pour rendre possible la déconstruction sélective et le réemploi des matériaux à grande échelle. Les pouvoirs publics ont un rôle à jouer, à travers leurs appels d'offres par exemple, pour permettre l'émergence des nouveaux processus nécessaires au passage à l'échelle de la déconstruction sélective et du réemploi des matériaux. Ces nouvelles pratiques nécessitent de nouveaux équipements industriels, comme les robots de démolition, dont le prix doit devenir compétitif pour être plus accessible.

Au niveau de l'électrification, il s'agira de mettre en place des mesures fiscales afin d'encourager des choix de mobilité partagée ou l'orientation vers des véhicules plus légers. Des mesures fortes doivent également être prises pour soutenir la recherche et le développement sur le recyclage du graphite et du lithium dans les batteries et piles à combustible. Cela nécessitera des avancées techniques et scientifiques en chimie et implique une transformation des procédés aujourd'hui mis en œuvre. En parallèle, un investissement important doit être fourni pour développer un système de collecte, de tri et de valorisation adapté aux batteries, aux piles à combustibles et à la récupération du cuivre et de l'aluminium disséminés dans de nombreux produits de consommation. L'augmentation des appels d'offres techniques et des subventions à l'investissement pour développer de nouvelles solutions visant à prolonger la durée de vie des batteries, piles à combustibles, pompes à chaleur, etc. est également nécessaire pour limiter la consommation de matériaux critiques. De plus, une filière compétitive doit naître pour prendre en charge le réemploi et le reconditionnement des composants utilisés dans chacun des domaines de l'électrification. Des aides seront indispensables à son émergence. Enfin, des investissements doivent être fléchés vers les potentiels miniers disponibles afin de sécuriser les approvisionnements français.

Concernant la filière de la chaleur et des biomasses, le besoin en investissements porte principalement sur l'industrialisation à grande échelle des technologies de gazéification (méthanation, pyrogazéification et gazéification hydrothermale). Le développement de ces technologies doit s'accélérer pour permettre leur déploiement massif d'ici une dizaine d'années. Par ailleurs, des efforts supplémentaires sont à mener sur la distribution de CEE afin d'accélérer la rénovation énergétique des bâtiments et réduire ainsi les besoins en chaleur. En outre, des appels d'offres techniques et des subventions à l'investissement sont indispensables pour réduire les nuisances dégagées par les procédés des centrales biomasses. Il s'agit, en effet, de développer les technologies de filtration des fumées afin d'améliorer la qualité de l'air aux alentours des installations et, par conséquent, de faciliter l'acceptabilité sociale de ces projets.



3.3 FAIRE QUE L'ÉCOCONCEPTION DES PRODUITS ET SERVICES DEVienne LA NORME

3.3.1 L'écoconception, une approche transformatrice à tous les niveaux

L'écoconception vise à concevoir une stratégie, des produits ou des services en anticipant les **impacts et les opportunités** sur l'ensemble de leur **cycle de vie**. L'analyse du cycle de vie découpe celui-ci en trois grandes étapes : l'extraction et la fabrication, la phase opérationnelle et la fin de vie. Il s'agit de maximiser la création de valeur économique et sociétale tout en minimisant les externalités négatives sur l'environnement.

L'application systématique des principes de l'écoconception vise une transformation complète des modèles économiques et opérationnels de l'entreprise, ce qui exige la mobilisation coordonnée de toutes ses fonctions : **direction stratégique, marketing produit et services, bureaux d'études, équipes process et marketing clients**. La massification des leviers Éviter, Réduire, Réemployer et Recycler nécessite donc des réflexes d'écoconception à chaque niveau de l'organisation.

La prescription d'écoconception vaut également pour les services de l'Etat et des collectivités lorsqu'elles élaborent des politiques publiques industrielles et territoriales. À l'échelle européenne, le produit durable et écoconçu doit devenir la norme par le biais de la réglementation. Il est également nécessaire de faire preuve de vigilance vis-à-vis du *green washing*, qui devrait être perçu comme une forme de concurrence déloyale et donc répréhensible aux yeux de cette même réglementation.

3.3.2 Les métiers de l'entreprise agissent ensemble, mais sur des leviers parfois différents

Les directions de la stratégie et les directions marketing produits/services sont impliquées au premier chef pour limiter la consommation des ressources et éviter le gaspillage. Dans le paradigme linéaire classique, la stratégie et le marketing ont pour objectif de vendre toujours plus de produits, ce qui demande constamment de nouvelles quantités de matières et fait de la croissance l'indicateur-roi. Le levier Éviter impose de transformer le modèle économique de l'entreprise en redéfinissant son objectif essentiel entre **croissance, rentabilité et pérennité (ou résilience)**. À titre d'illustration, une entreprise peut trouver la réussite en passant d'un modèle de vente de produits à un modèle de fourniture de services à l'instar du secteur des chauffagistes, fabricants d'équipements de chauffage et d'énergéticiens. Dans une logique de maximisation des profits, ces entreprises étaient poussées à vendre un maximum d'équipements neufs, associés à une consommation d'énergie la plus élevée possible. Dans le nouveau modèle, elles deviennent tiers investisseur et propriétaires des équipements, dans un modèle « Energy-as-a-Service ». Elles deviennent plus soucieuses de la consommation de matières et d'énergie, et leur intérêt est de prolonger au maximum la durée de vie de leurs matériels. Elles les conçoivent par conséquent de manière à actionner les autres leviers de la circularité afin d'en accroître la robustesse et d'en faciliter la réparation, la réutilisation et le recyclage.

L'**écoconception stratégique** repense le portefeuille produit en fonction de son impact à chaque étape du cycle de vie (et non pas uniquement à sa fabrication). Elle étudie la présence et les activités commerciales de l'entreprise tout au long de la chaîne : vente initiale, utilisation du produit, puis seconde vie, flux circulaires retours et fin de vie. Elle envisage la création de **nouveaux modèles économiques** autour des principes de la fonctionnalité et du partage, en basculant de la vente de produits vers la fourniture de services récurrents, que ce soit aux particuliers ou aux entreprises. Ce sont les exemples nombreux des plateformes de mobilité partagées, des logements en co-location, des espaces de travail partagés, modèle que l'on retrouve jusque dans les équipements industriels et agricoles.

La **réduction** de la consommation des ressources concerne le **marketing produit, les bureaux d'étude et les équipes process**. Dans le secteur de l'énergie, il s'agit de réduire la dimension ou les poids des produits ou des installations, d'améliorer leur démontabilité pour en faciliter la réparation, le réemploi, la réutilisation, ou le recyclage des composants et de privilégier les matériaux les moins critiques. Par exemple, les véhicules électriques peuvent être allégés. La filière de la construction peut être plus économe également, notamment au regard de son impact considérable sur la consommation de ressources critiques (cf. Figure 16). De plus, il peut s'agir de trouver de nouveaux procédés, de consommer moins d'énergie, de matière et d'eau ou de générer moins de déchets à chaque étape de la chaîne de valeur. L'indicateur de performance n'est plus le produit vendu, mais la quantité de matières rapportée à l'usage, dans une logique de durabilité.

L'allongement de la durée de vie inclut une écoconception sur les dimensions fonctionnelles, techniques et esthétiques du produit comme du service qu'il apportera pour limiter le rythme de remplacement des parcs, flottes et infrastructures. Au-delà du design relatif aux caractéristiques intrinsèques du produit, les solutions sont conçues pour être facilement réparables. Les filières et les industries renforcent leurs activités de maintenance et de réparation, autant créatrices de valeur pour elles que pour leurs clients.

Le réemploi implique les mêmes équipes avec un niveau de défi supplémentaire. Le réemploi de pièces et de composants concerne autant la maintenance (pièces de rechange de seconde vie) que la remanufacture, qui consiste à assembler des produits nouveaux, d'une qualité comparable au neuf. Pour cela, les équipes doivent développer la modularité des produits, faciliter le désassemblage et le réassemblage (et le recyclage). Une piste possible pour amplifier ce mouvement serait de renforcer les normes afin de rendre davantage de composants interchangeables et d'offrir davantage de débouchés aux équipementiers qui respectent les standards. Cette mesure serait particulièrement indiquée pour le marché des pompes à chaleurs, qui consomment de nombreuses pièces mécaniques et dont le parc résidentiel et tertiaire, dans les scénarios de l'étude, passera de 14 GWth aujourd'hui à environ 180 GWth en 2050.

Enfin le marketing clients, en plus de son intervention sur la conception initiale, doit fortement repenser l'implication positive du client à toutes les étapes.



3.4 CRÉER LES CONDITIONS DE L'INDÉPENDANCE EN RESSOURCES EN RÉORGANISANT L'ÉCONOMIE SUR LE TERRITOIRE

3.4.1 Systématiser l'écologie industrielle et territoriale (EIT)

La transition vers l'économie circulaire implique une mise en mouvement des territoires : collectivités, filières, citoyens-consommateurs... L'échelle d'application des projets circulaires doit donc être réfléchie en amont afin de développer des **écosystèmes collaboratifs** au sein desquels les ressources locales (énergétiques, matières, mais également savoir-faire) seraient valorisées en priorité. Ces écosystèmes auraient également pour objectif de faciliter les partenariats stratégiques entre acteurs industriels d'un même territoire de manière à renforcer les chaînes de valeur.

Pour cela, l'écologie industrielle et territoriale (EIT) doit être systématisée. L'EIT vise à créer des synergies entre acteurs économiques (publics ou privés) afin de mutualiser les ressources ou de les substituer. Par exemple, la chaleur fatale des industries, des centrales thermiques ou des centrales nucléaires d'un territoire peut être récupérée pour être valorisée dans des réseaux et alimenter des bâtiments tertiaires fortement consommateurs (hôpitaux, enceintes sportives, réseaux de transports...) ou des parcs de logements individuels. La chaleur fatale peut également être récupérée en ville, à l'aide de pompes à chaleur sur boucles d'eau tempérée. Outre la chaleur fatale, historiquement considérée dans les démarches d'EIT, **toutes les ressources** peuvent faire l'objet d'un bouclage territorial : matières énergétiques, ressources humaines ou encore capacités logistiques. L'EIT répond à un objectif de valorisation des ressources locales et disponibles en abondance.

L'EIT permet de multiplier les exutoires locaux et participe ainsi à la réduction globale des coûts (économiques et environnementaux) liés à la récupération et au traitement des déchets. Par exemple, les déchets urbains et industriels, habituellement stockés ou enfouis, peuvent être valorisés localement, ce qui permet d'éviter les émissions de GES que provoque leur décomposition. La multiplication des exutoires favorise également une optimisation de la logistique (avec une préférence donnée aux circuits courts) et réduit les coûts de transport. Par exemple, en 2019, a été expérimentée une déchèterie fluviale à destination des professionnels du quartier des Deux Rives à Paris, très dense mais traversé par la Seine. Enfin, l'EIT offre aux acteurs

économiques la perspective d'intégrer leur empreinte locale dans leur modèle économique, avec une attention particulière portée à l'écosystème naturel, aux partenaires en présence et aux débouchés. L'EIT peut favoriser, par exemple, un réaménagement plus qualitatif des Surfaces Agricoles Utiles (SAU) utilisées pour les biomasses gazeuses et liquides ou un entretien des forêts plus exigeant vis-à-vis de la biodiversité.

3.4.2 Mailler le territoire d'infrastructures de récupération, tri, stockage et valorisation

L'approche territoriale de l'économie circulaire nécessite l'évolution des modèles économiques des entreprises. Un modèle industriel circulaire va **structurer l'offre en fonction des ressources présentes localement**, des savoir-faire facilement mobilisables et des exutoires disponibles (par exemple, de valorisation de la biomasse), puis répliquer ce modèle à d'autres zones géographiques comparables. La **réplication multi-locale** suppose une agilité forte des organisations et l'identification préalable de partenaires stratégiques, d'un marché et des ressources disponibles. Dans ce dernier cas, l'identification s'opère grâce à des outils numériques de **cartographie** qui permettent d'optimiser l'usage des surfaces disponibles en fonction des usages prioritaires.

Le pivot des industriels vers la circularité et des modèles économiques basés sur une approche multi-locale doit donc être accompagné par les collectivités territoriales. À ce titre, la loi AGECE octroie la compétence de « développement et animation de l'économie circulaire » aux **Régions**. Cela peut se matérialiser par des soutiens financiers, par exemple pour développer l'EIT et assurer/construire un **maillage territorial d'infrastructures** adéquat, comme évoqué précédemment : canaux de distribution, plateformes de stockage et de réemploi, installations de valorisation des CRS ou de type lit fluidisé, centres de recyclage, infrastructures logistiques et transports en commun...

3.4.3 Développer une économie du PIB local

La mise en mouvement d'un territoire autour de l'économie circulaire participe à la création d'emplois locaux et renforce son attractivité. L'économie du « PIB local » qui pourrait ainsi émerger serait à même de garantir une plus grande **résistance face aux chocs** conjoncturels et une plus forte indépendance vis-à-vis des ressources.

La **commande publique**, abordée dans d'autres parties, doit être orientée vers des offres circulaires et/ou locales. Des clauses de restriction géographique pourraient être envisagées. Présentées comme une solution aux tentations protectionnistes qui ont suivi la crise financière de 2008, elles permettent de ne pas ouvrir des marchés tant que les autres parties ne font pas de même. Outre la commande publique, et selon les compétences des collectivités territoriales, les offres de formations (continues ou initiales) pourraient contenir des modules sur l'écoconception, l'EIT, ou encore la gestion des ressources.

Enfin, les **citoyens-consommateurs** doivent être associés pour obtenir **l'acceptabilité sociale** des projets, notamment la relocalisation de mines du lithium ou le développement d'infrastructures de valorisation de biomasses, qui peuvent dégager des nuisances.



3.5 S'APPUYER SUR LE DIGITAL POUR METTRE EN ŒUVRE LES STRATÉGIES D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Déjà largement utilisées, les solutions digitales auront un rôle essentiel pour optimiser la consommation des ressources et transformer l'économie linéaire en écosystèmes circulaires. Elles seront un catalyseur important pour la mise en œuvre de la SNBC sous contrainte de ressources aux côtés du renforcement du cadre légal, du financement, et de la recherche et développement.

Les solutions digitales, notamment l'intelligence artificielle, ayant elles-mêmes un impact non négligeable en termes de consommation énergétique et de ressources minérales critiques, il conviendra de les utiliser à bon escient pour les usages essentiels et créateurs de valeur de l'économie circulaire.

3.5.1 Grâce à la traçabilité, le digital restitue leur valeur aux ressources anonymes et les convertit en produits à haut contenu circulaire

Le digital et la data sont indispensables pour sortir les ressources précieuses de l'**anonymat du déchet** et en faire des **produits identifiés**, tracés dans leur parcours de recyclage et de réemploi, et sécurisés par rapport à un **cadre contractuel et assurantiel** jusqu'à présent construit pour les ressources vierges. Pour la réussite de la bascule vers une économie bas carbone sous contrainte de ressources, toutes les industries de biens de consommation et d'équipements doivent travailler à inclure non seulement les données relatives au carbone, mais aussi celles liées aux ressources critiques dans leur chaîne de performance digitale, à commencer par leurs processus et leurs outils d'écoconception.

Un des freins majeurs au développement de l'économie circulaire est l'**assurabilité des biens et équipements à haut contenu circulaire**. Plusieurs exemples typiques se présentent dans la construction ou les biens d'équipement. Dans la construction, les assureurs sont souvent réticents à assurer des bâtiments construits avec du béton recyclé, voire des éléments constructifs pris sur des bâtiments déconstruits et

réemployés (poutres en béton ou acier, équipements en aluminium, bois, fenêtres...), car ils ne présentent pas les garanties usuelles sur les ressources utilisées.

Pour des équipements comme les éoliennes, parcs solaires ou chaufferies biomasses, un client pourrait trouver un intérêt à se fournir en pièces de rechange de seconde vie, mais souhaiter néanmoins **grâce à la traçabilité avoir des garanties suffisantes** sur l'état de la pièce et connaître le niveau de performance envisageable afin de l'intégrer au mieux dans son processus de maintien en conditions opérationnelles.

Dans le cas de la construction, des outils digitaux de **marquage des lots et des pièces** pourront être utilisés lors de la **déconstruction sélective** du bâtiment pour identifier directement sur site, dès leur dépose, les éléments constructifs ou les lots. La traçabilité suivra ensuite l'objet (fenêtre, escalier, équipement) ou la ressource tout au long de son parcours de tri, de qualification, de reconditionnement et logistique jusqu'à son intégration dans le nouveau bâtiment. Par ailleurs, la généralisation des outils de modélisation des informations du bâtiment (BIM) permettra de **suivre l'origine des composants utilisés dans le nouvel édifice** (jusqu'au cycle suivant) et d'en adapter la maintenance. Des **tiers de confiance** pourront intervenir dans le parcours physique et digital du produit pour certifier son origine et sa qualité.

Dans un processus impliquant de nombreux acteurs qui ne se connaissent pas forcément et nécessitant entre eux un certain niveau de confiance, des **technologies de type blockchain**⁴⁰ sécurisent l'authenticité et la fiabilité des informations associées aux produits et aux matières échangées. Elles tracent de façon irréversible et infalsifiable l'origine et le parcours de ces ressources.

La généralisation du **passport numérique** pour tous les produits couverts par le règlement sur les produits durables (proposée dans le paquet économie circulaire de la Commission Européenne du 30 mars 2022) accompagnera ce paradigme et accélérera ces transformations qui apporteront toujours plus de traçabilité et de données utiles aux recycleurs, réparateurs, opérateurs et consommateurs. En définitive, cela permettra de distinguer et de valoriser les produits à haut contenu circulaire en levant tous les doutes à leur sujet.

⁴⁰ Il existe de multiples standards et façons d'intégrer des solutions de types blockchain, dans un continuum qui va des pures blockchains de type bitcoin énergivores et peu performantes sur des flux élevés, en passant par des standards améliorés, jusqu'à des solutions proches de l'informatique classique, ne reprenant qu'une partie des concepts de la blockchain et sobres en énergie.

3.5.2 Les plateformes de filières et les plateformes territoriales faciliteront la mise en relation des acteurs et des flux physiques

Mettre en place une économie circulaire signifie connecter entre eux les acteurs d'un écosystème nouveau. Il s'agit d'une mise en relation complexe d'acteurs et de flux physiques, non seulement verticalement, **au sein des chaînes de valeur sectorielles**, mais aussi horizontalement, entre des **secteurs différents opérant sur un même territoire**. Les places de marché s'appuyant sur les plateformes, le cloud et les outils mobiles permettront de gérer à grande échelle les échanges de produits de fin de vie et de seconde vie. Ces plateformes intelligentes constitueront un moyen d'échange raisonnablement transparent entre les acteurs de la chaîne de valeur, afin de :

- Faciliter la mise en relation et l'orchestration de ce nouveau marché d'intermédiation ;
- Surveiller les besoins en approvisionnement en matières premières et secondaires ;
- Ajuster l'offre et la demande en temps réel ;
- Suivre la collecte, la réparation et/ou la revente des produits, composants et matières ;
- Permettre la facturation, voire le paiement ;
- Établir des indices et des prix de référence ;
- Anticiper les volumes à produire, stocker et redistribuer pour chaque ressource.

3.5.3 La convergence des technologies numériques permettra une économie circulaire à la fois industrialisée et individualisée

Le développement du numérique doit ici se faire sur deux axes : il s'agit non seulement d'accélérer la digitalisation dans les secteurs **industriels spécifiques du recyclage et du réemploi**, mais aussi de généraliser et injecter la contrainte de ressources dans les outils de production et de gestion d'infrastructures de **tous les secteurs**.

L'industrie intelligente bénéficie de nombreuses technologies nouvelles (Figure 36) adaptées aux quatre acteurs clés de l'économie circulaire : les acteurs de l'écoconception, les industriels du réemploi et du recyclage, les places de marché, et l'usine intelligente économe en ressources.

Parmi ces technologies, citons notamment :

- l'intelligence artificielle (dont le machine learning) pour l'aide à la décision, la détection et l'identification d'image, l'optimisation sous contrainte, la formulation de diagnostics et les plateformes intelligentes ;
- la blockchain pour sécuriser les transactions, et garantir la traçabilité et l'assurabilité des objets ;
- la connectivité, le cloud et l'edge computing pour optimiser la répartition de la puissance de calcul et des échanges de données entre le central et le local, et faciliter le suivi, l'analyse et l'action en temps réel ;
- l'internet des objets, les capteurs et les actionneurs pour coupler les données et les objets, obtenir des informations du terrain et agir à bon escient, par exemple pour prédire les maintenances nécessaires et allonger les durées de vie ;
- les outils de scanner et d'impression 3D pour fabriquer des objets sur-mesure, et éviter ou réduire le besoin en ressources ;
- les outils de l'opérateur augmenté (robots et co-bots, réalité augmentée, exosquelettes) pour aider les ouvriers ou les techniciens à accomplir sans erreur et du premier coup des tâches complexes, pénibles ou diversifiées.

Figure 36: La convergence des technologies au service de l'économie circulaire de bout en bout

	Écoconception	Industriels de réemploi et recyclage	Place de marché / Mise en relation	Usine intelligente économe en ressources
 Plateformes		Gestion des flux optimisée	Plateforme pour l'organisation verticale par filière et horizontale territoriale	
 Intelligence artificielle	Outils d'aide au design des objets (computer-aided design tool)	Triage (computer vision) et démantèlement optimisés Réduction du scrap	Plateforme pour l'organisation verticale par filière et horizontale territoriale (plateforme intelligente)	Analyse, identification et solutions de diagnostic sur la santé des produits Réduction du scrap
 Blockchain	Traçabilité des objets écoconçus	Assurabilité des objets	Plateforme pour l'organisation verticale par filière et horizontale territoriale (assurabilité des objets)	Traçabilité des objets
 Cloud / Edge computing				Maintenance prédictive Gestion des infrastructures optimisée
 IoT / Capteurs & Actionneurs intelligents	Objets écoconçus « connectés »	Collecte et localisation des objets grâce à la connectivité (logistique)	Suivi de la collecte et de la localisation des objets grâce à la connectivité (logistique)	Maintenance prédictive
 Scan et impression 3D	Conception de produits originaux « lowtech »		Achat/vente de « produits 3D » pour la fabrication de biens à haut contenu circulaire	
 Opérateur « augmenté » et robotique	Outils d'aide au design des objets (computer-aided design tool)	Réduction du scrap (amont), démantèlement (aval)		Outils d'aide à la décision pour la fabrication

Le déploiement des technologies digitales permet de relier des univers linéaires pour les circulariser. Elles agissent conjointement sur l'écoconception, les industriels de réemploi et de recyclage, la place de marché et l'usine intelligente économe en ressources.

Digitaliser un processus industriel circulaire qui est à la fois décentralisé et centralisé, de la source à l'atelier

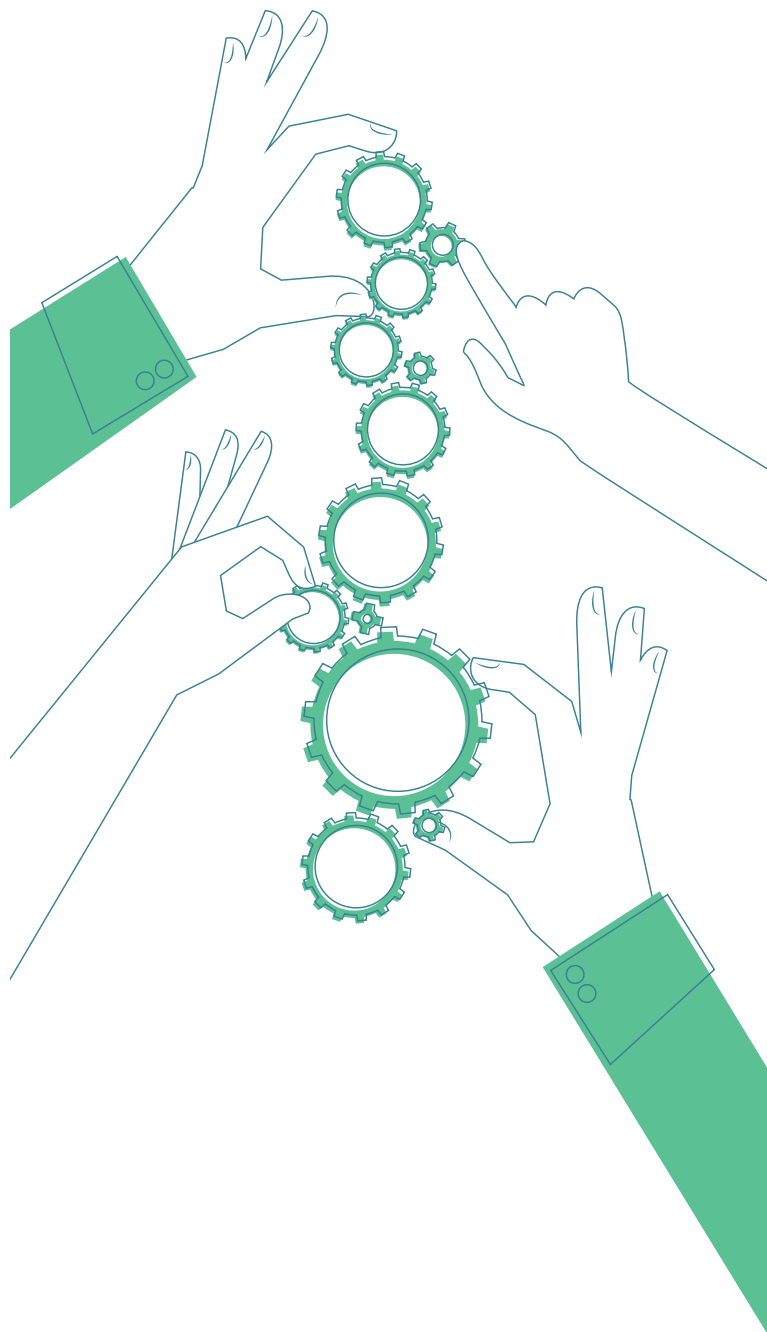
Ces solutions technologiques allient performance, agilité, personnalisation, et baisse des coûts en énergie et en ressources, et ce, dans de nombreuses industries.

Dans le processus de démantèlement, de remanufacture et de recyclage, il s'agira **d'industrialiser le recyclage et réemploi de produits ou ressources très spécifiques.**

Dans le bâtiment, le processus initial est décentralisé. Il intègre la dépose sélective sur site puis le centre de traitement proche. Il bénéficiera de l'automatisation pour affiner le tri, la logistique et améliorer la productivité, la qualité et la valorisation (réalité virtuelle, triage par laser, reconnaissance d'images, outillages dédiés, exosquelette, robots...). Les outils digitaux aident aussi à améliorer la collaboration le long de la chaîne entre le chantier, où la dépose sélective est en cours, et la plateforme de retraitement, qui accueillera les flux.

Le processus initial peut également gagner à être décentralisé pour les biens manufacturés, avec un taggage et une première individualisation du déchet ou de la pièce à la source (traçage), plutôt qu'une collecte en vrac avec le risque d'une moindre attention, d'un tri de moindre qualité et d'une détérioration des produits avant le traitement en site centralisé.

Dans les usines de reconditionnement et de fabrication de produits à partir de réemplois, la production adaptative permet d'ajuster l'action à réaliser en fonction du contexte. Cette reconnaissance de l'état de la pièce et du traitement à appliquer via des bibliothèques de traitements automatisés sera d'autant plus nécessaire qu'il faudra traiter à grande échelle les pièces issues d'une seconde vie, toutes différentes et avec une forte productivité (par exemple, dans des domaines tels que les produits de grande consommation, les véhicules, les batteries, les pompes à chaleur, etc).



3.6 SOUTENIR LA R&D ET L'INNOVATION EST NÉCESSAIRE POUR MIEUX PRÉSERVER LES RESSOURCES

La recherche et l'innovation doivent s'accélérer afin de trouver des matériaux et des processus plus respectueux de l'environnement (matériaux biosourcés, recyclés et surtout recyclables) tout en respectant les attentes en termes de coût, de qualité et de quantité. Cela passe notamment par le développement des coopérations et la création de synergies entre les différentes parties prenantes (chercheurs, designers, producteurs, recycleurs, acheteurs).

L'innovation devra porter en priorité sur les domaines où les ressources sont critiques et susceptibles de manquer

- Pour accroître le recyclage, il faudra améliorer la recyclabilité des métaux, en particulier le lithium et le graphite, cruciaux pour les batteries et non recyclables avec les processus actuels. La Chine se montre active dans les publications scientifiques sur ces sujets.
- Pour favoriser la réduction des besoins, il faudra identifier et approfondir les technologies permettant d'utiliser moins de matières premières pour une quantité ou une qualité équivalente. Par exemple, pour les panneaux photovoltaïques, le pérovskite et la couche mince pourront être développés en France afin de se passer du silicium selon L'Institut Photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF).
- Dans le domaine des biomasses, la pyrogazéification et la gazéification hydrothermale devront se montrer plus compétitives pour être industrialisables et déployables à plus grande échelle.
- Les filières devront s'efforcer d'intégrer davantage de matériaux recyclés, biosourcés ou renouvelables (métaux, béton). Sur la construction en particulier, le béton recyclé sera un composant clé d'une filière plus durable et circulaire.
- L'écoconception est à elle seule un domaine de recherche et d'innovation afin d'en optimiser et d'en outiller les principes et les pratiques (cf. 3.3).

Les innovations ne doivent pas être uniquement technologiques ou techniques, mais aussi d'ordre économique, juridique et fonctionnel

- La loi et la réglementation devront évoluer parallèlement aux filières afin que les produits recyclés soient davantage intégrés aux chaînes de valeur, pour qu'ils deviennent plus fonctionnels et qu'ils ne posent plus de difficultés vis-à-vis des assurances. Des recherches techniques seront aussi nécessaires pour garantir la fiabilité des produits recyclés ou réemployés.
- De nouveaux modèles innovants (« as-a-service ») et des systèmes de financement adaptés devront être mis en œuvre pour faire de l'économie sociale et solidaire une industrie à part entière.
- L'innovation frugale ou « low-tech » pourra aussi trouver sa place pour proposer des solutions adaptées à l'évolution des comportements et viables du point de vue économique, social et environnemental, à l'image de smartphones plus fonctionnels (tel que Fairphone) ou de modèles d'automobiles plus légers et moins consommateurs de ressources ciblant les usages urbains ou péri-urbains (Citroën Ami, Renault Zoé).



4 ANNEXE I - MÉTHODOLOGIE

4.1 HYPOTHÈSES DES SCÉNARIOS A ET B

Cette annexe apporte des compléments à la description des scénarios A et B, présentée au chapitre 1.3.2 et résumée dans la Figure 9. Le Scénario A, dit « à circularité faible » (ou tendancielle), est fortement axé sur l'électrification et le Scénario B, dit « à circularité renforcée », met plus fortement en œuvre les quatre leviers circulaires, Éviter, Réduire, Réemployer et Recycler (ERRR).

Dans les deux cas, les hypothèses ont été établies d'après le scénario S3 du document Transition(s) 2050 de l'ADEME⁴¹. Elles ont été modulées pour différencier clairement les scénarios A et B en fonction de leurs partis-pris respectifs. Pour certains aspects, le calage de cette modulation s'est appuyé sur les scénarios DGEC AMS⁴² ou sur les scénarios Futurs Possibles 2050⁴³ de RTE. La Figure 36 rassemble les hypothèses ainsi constituées.

La modélisation a été réalisée en quelques semaines. L'effort s'est plus particulièrement concentré sur les questions de la criticité et des ressources. Un premier niveau de bouclage a été assuré sur les TWh entre usages et productions, sans prétendre à la perfection. Aucune modélisation en gaz à effet de serre n'a été conduite. On part du postulat qu'à minima, les scénarios A et B restent conformes aux objectifs de la SNBC parce qu'ils sont dérivés de scénarios qui le sont et qu'ils ne réintroduisent aucune énergie fossile. Toutefois, on peut espérer qu'ils apportent une amélioration du point de vue des émissions puisqu'ils consomment moins de ressources, du moins minérales⁴⁴.

Les hypothèses sont prises pour 2050. Pour simplifier, les hypothèses sont soit supposées constantes entre aujourd'hui et 2050, soit, le cas échéant, en évolution linéaire jusqu'à cette date⁴⁵.



⁴¹ [ADEME 2021a]

⁴² [DGEC 2020a]

⁴³ [RTE 2021a]

⁴⁴ La question de l'intensification de l'exploitation du potentiel de biomasse nationale pose des questions plus subtiles de bilan net, par exemple entre émissions évitées et réduction des puits de carbone, d'intensité du recours aux intrants, de changement d'utilisation des sols.

⁴⁵ Existente aussi dans la modélisation quelques cas non linéaires liés à l'émergence de nouvelles technologies. C'est le cas, par exemple, de la gazéification hydrothermale, dont les volumes sont nuls en 2020 et 2030, et faibles en 2040.

Figure 37: Hypothèses de construction des scénarios A et B établis à partir des scénarios d'autres sources (ADEME Transitions S3, RTE Futurs énergétiques et DGEC AMS Gaz bas)

	Scénario A à circularité faible	Scénario B à circularité forte
Résidentiel Tertiaire, Bâtiment Neuf et Rénovations		
Nb de personnes par ménage	S3 2,02	S3 +5% 2,12
Nb de logements vacants et résidences secondaires	S3 Un peu moins de 10% du parc	S3 – 25% Un peu moins de 7,5% du parc
Rénovations efficaces	S3 – 400 000 par an	S3 + 660 000 par an
Constructions neuves	S3 320 000 par an	S3 - 175 000 par an
m² tertiaires par habitant	S3 + 5% 15,0	S3-5% 13,6
Consommations d'énergie	S3 471 TWh (MTE AMS = 450 TWh)	S3 – 10% 433 TWh (MTE AMS = 450 TWh)
Électrification	++++	+++
Biomasse et gaz verts	++	+++
Chaleur puisée par les pompes à chaleur	S3 + 10%	S3
% PAC 100% élec vs % PAC Hybrides élec gaz	85%-15%	63%-37%
Industriel		
Consommations d'énergie	S3 + 10% 331 TWh dont 54 TWh d'H2	S3 = MTE AMS 305 TWh dont 24 TWh d'H2
Transports		
Routier – nombre de véhicules légers et lourds	RTE Futurs possibles Nb 2050 = Nb actuel 44,7 millions	RTE – 10% Nb 2050 = Actuel – 10% 40 millions
Routier – mix motorisations et carburants	S3 150 TWh Fortement électrifié ; un peu d'hydrogène ; pas de gaz	MTE AMS 168 TWh Électrifié ; un peu d'hydrogène ; gaz en véhicules lourds
Rail, aérien, maritime	MTE AMS	MTE AMS
Énergies finales		
Énergie finale totale	1 000 TWh (MTE AMS 975 TWh)	950 TWh (MTE AMS 975 TWh)
Chaleur réseaux	S3 47 TWh	S3-10% 43 TWh
Biomasses (TWh EF PCI)	S3 375 TWh	S3 + 15% 435 TWh
Biomasses solides et gazeuses (TWh EF PCI)	253 TWh Solides en chaleur directe et en réseaux de réseaux 103 TWh ; Gaz méthanisation 102 TWh ; Gaz pyrogaséification 48 TWh ; Gaséification hydrothermale 0 TWh	308 TWh Solides en chaleur directe et en réseaux de réseaux 94 TWh ; Gaz méthanisation 123 TWh ; Gaz pyrogaséification 65 TWh ; Gaséification hydrothermale 26 TWh
Biomasses biocarburants	84 TWh	89 TWh
Biomatériaux, bioplastiques	S3 37 TWh	S3 37 TWh
Méthanation	40 TWh	40 TWh
Hydrogène	69 TWh tous usages 47 TWh pour méthanation associée à méthanisation Total 116 TWh	33 TWh tous usages 47 TWh pour méthanation associée à méthanisation Total 80 TWh
Production d'électricité	716 TWh	593 TWh
Production nucléaire (GW)	RTE N1 171 TWh	RTE N1 171 TWh
Production solaire PV, éolien en mer, éolien terrestre	Proportions de RTE N1 ajustées au prorata pour produire 469 TWh de façon à obtenir un total de 716 TWh	Proportions de RTE N1 ajustées au prorata pour produire 346 TWh de façon à obtenir un total de 593 TWh
Production autres : hydraulique...	75 TWh	75 TWh



4.2 FLUX BRUTS, FLUX CIRCULAIRES ET FLUX NETS

L'étude modélise à la fois les fins de vies et les besoins pour la construction d'équipements.

Pour chaque domaine et chacune des ressources considérées, on modélise, dans les deux scénarios A et B, les flux de fins de vie (ou de déconstruction), les flux circulaires ERRR et les flux neufs (ou de construction). Des ratios permettent de transformer les unités d'œuvres issues des scénarios A et B en flux bruts ou en flux théoriques. L'application des % ERRR permet de quantifier les flux circulaires, qu'ils soient totalement virtuels (% Éviter), virtuels mais associés à une activité économique de conception, de service ou de maintenance (% Réduire), ou complètement physiques, avec une logistique, des transformations industrielles et une activité économique correspondante (% Recycler, % Réemployer).

Les flux nets de fin de vie qui finiront en centres de stockage ou en recyclage à faible valeur ajoutée sont égaux aux flux bruts diminués des flux injectés dans l'économie circulaire.

Les flux nets de besoins qui requièrent des importations ou des extractions sur le sol national correspondent aux flux bruts de besoin diminués des flux produits par l'économie circulaire.

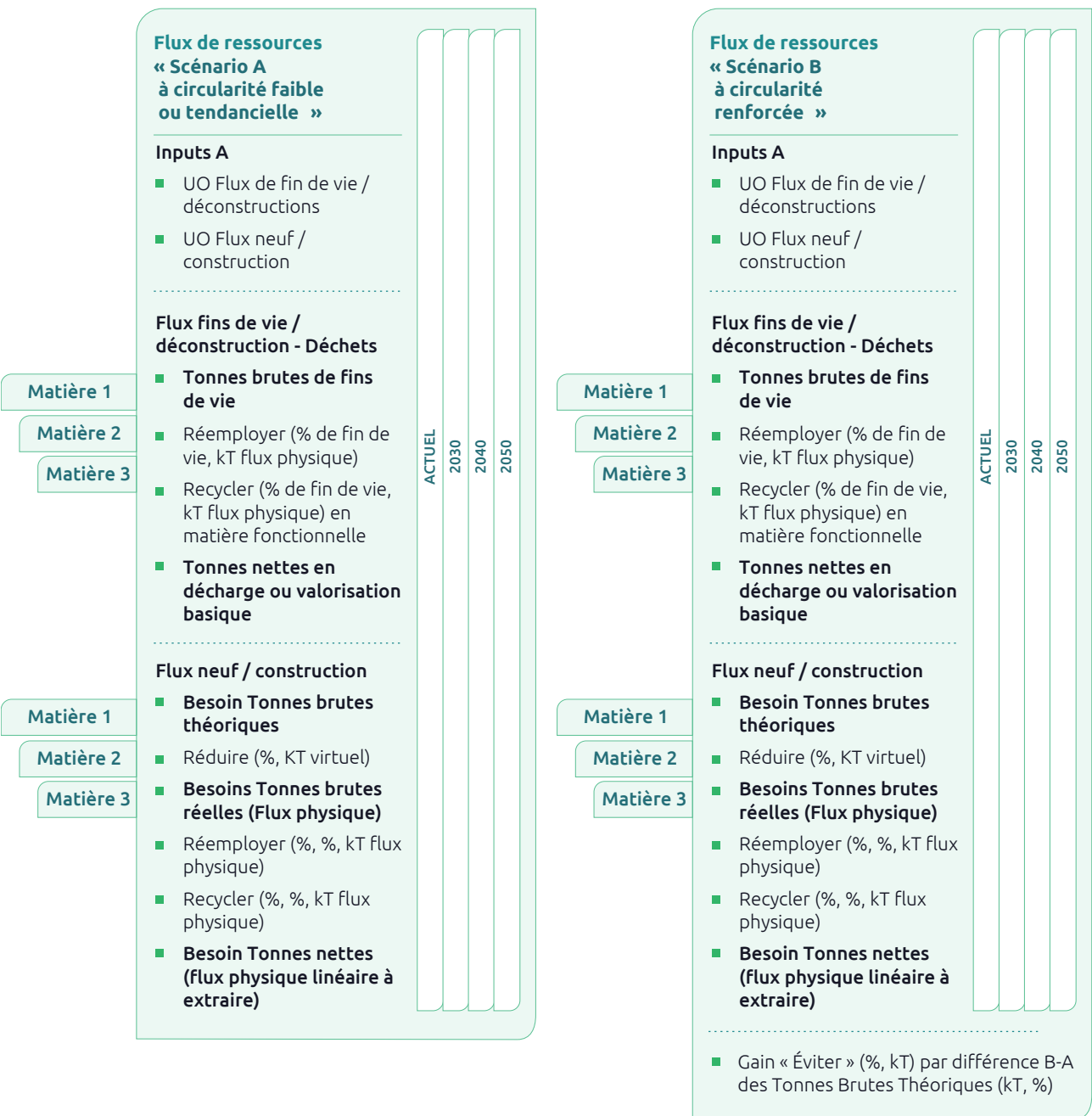
La Figure 38 synthétise les différents flux des scénarios A et B.



Figure 38: Modélisation des flux bruts, des flux circulaires résultant des % ERRR et des flux nets

Segments et ratios

- Ratios Tonnes par Unité d'Œuvre (UO) en économie linéaire. Multipliés par les UO de Flux de Fins de vie, ils donnent les Tonnes brutes de fins de vie. Multipliés par les UO de flux neuf/constructions ils donnent les besoins bruts théoriques, chiffres qui servent de ligne de base pour l'application des % Réduire, % Éviter, % Réemployer.
- Sous segments techniques éventuels s'appliquant à un domaine, nécessitant l'application de ratios différenciés.



4.3 HYPOTHÈSES ERRR : TABLEAU DES %

Cette section présente les tableaux d'hypothèses prises pour les % Éviter, % Réduire, % Réemployer et % Recycler (%ERRR.)

4.3.1 % Éviter

Il n'y a pas de prises d'hypothèses sur les % Éviter. Ce sont les hypothèses prises en amont dans le scénario B par rapport au scénario A qui créent les gains : choix de mix de domaines moins consommateurs en ressources pour un même usage final, maîtrise des consommations d'énergie et sobriété au sein d'un domaine qui amène à avoir moins besoin d'équipements.

4.3.2 % Réduire

Les hypothèses de réduction des quantités de matière utilisées ont été prises pour les deux scénarios entre aujourd'hui et en 2050. Les hypothèses en 2030 et 2040 sont de simples extrapolations linéaires. La Figure 39 rassemble les chiffres pour chaque ressource et chaque domaine pour les scénarios A et B.

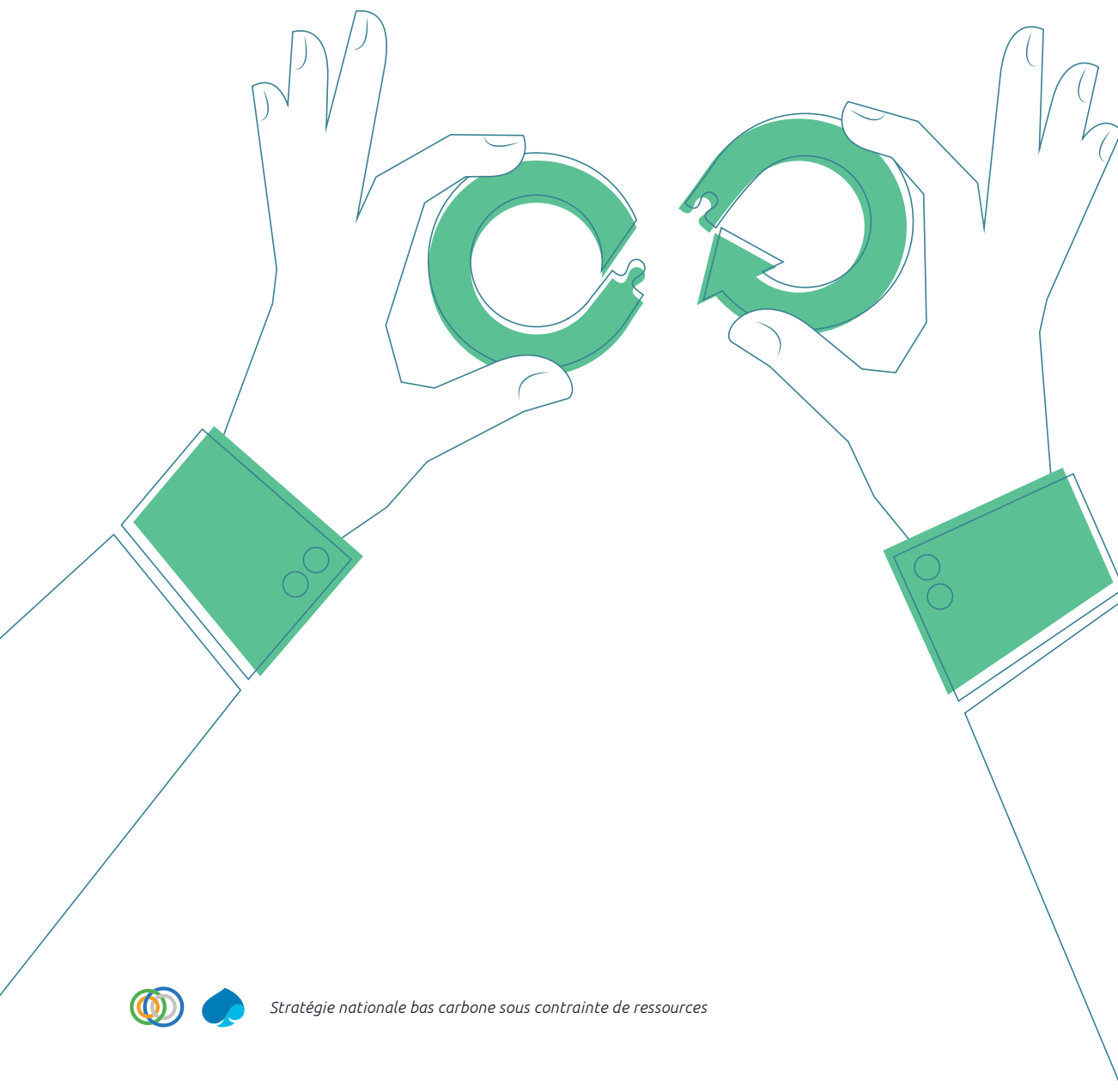


Figure 39: Hypothèses % Réduire

		% RÉDUIRE							
		SCÉNARIO A CIRCULARITÉ FAIBLE				SCÉNARIO B CIRCULARITÉ FORTE			
		ACTUEL	2030	2040	2050	ACTUEL	2030	2040	2050
Lithium	Véhicules électriques	0%	0%	0%	0%	0%	10%	20%	30%
Cobalt	Véhicules électriques	0%	0%	0%	0%	0%	20%	40%	60%
Platinoïdes	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Platinoïdes	Véhicules hydrogène	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Terres Rares	Éolien en mer	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Terres Rares	Éolien terrestre	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Terres Rares	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Terres Rares	Véhicules hydrogène	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Cuivre	Éolien en mer	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Cuivre	Éolien terrestre	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Cuivre	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Cuivre	Nucléaire	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Cuivre	Pompe à chaleur	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Cuivre	Réseaux électriques	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Cuivre	Solaire photovoltaïque	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Cuivre	Véhicules électriques	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Cuivre	Véhicules hydrogène	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Graphite	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Graphite	Véhicules électriques	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Graphite	Véhicules hydrogène	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Silicium	Solaire photovoltaïque	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Aluminium	Bâtiments - neuf	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Aluminium	Bâtiments - rénovation performante	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Aluminium	Éolien en mer	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Aluminium	Éolien terrestre	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Aluminium	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Aluminium	Pompe à chaleur	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Aluminium	Réseaux électriques	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Aluminium	Solaire photovoltaïque	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Aluminium	Véhicules électriques	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Aluminium	Véhicules hydrogène	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Nickel	Éolien en mer	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Nickel	Éolien terrestre	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%

		% RÉDUIRE							
		SCÉNARIO A CIRCULARITÉ FAIBLE				SCÉNARIO B CIRCULARITÉ FORTE			
		ACTUEL	2030	2040	2050	ACTUEL	2030	2040	2050
Nickel	Géothermie profonde	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Nickel	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Nickel	Nucléaire	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Nickel	Pompe à chaleur	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Nickel	Véhicules électriques	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Nickel	Véhicules hydrogène	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Bâtiments - neuf	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Bâtiments - rénovation performante	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Biomasse gazeuse	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Biomasse solide	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Éolien en mer	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Éolien terrestre	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Géothermie profonde	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Nucléaire	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Pompe à chaleur	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Réseaux de chaleur	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Réseaux électriques	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Solaire photovoltaïque	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Véhicules électriques	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Acier	Véhicules hydrogène	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Béton	Bâtiments - neuf	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Béton	Bâtiments - rénovation performante	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Béton	Biomasse gazeuse	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Béton	Biomasse solide	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Béton	Éolien en mer	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Béton	Éolien terrestre	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Béton	Géothermie profonde	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Béton	Nucléaire	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Béton	Réseaux de chaleur	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Béton	Réseaux électriques	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%
Béton	Solaire photovoltaïque	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%



4.3.3 % Recycler

Les hypothèses relatives aux % Recycler sont établies en trois temps :

- % Recycler – Collectes des fins de vie : c'est la proportion des matières en fin de vie collectées et injectées dans le processus de recyclage ;
- % de rendement du processus de recyclage : c'est la proportion de matières fonctionnelles réutilisables par rapport aux matières entrées dans le processus de recyclage ;
- % Recycler – Matière fonctionnelle réutilisée (pour des besoins industriels) : c'est le produit des deux % précédents.

On a également pris comme hypothèse que la somme des collectes % Recycler et % Réemployer ne pouvait dépasser 90 %, ce qui explique que les % Recycler dans les tableaux ci-dessous n'atteignent pas toujours un maximum de 90 %.

Les chiffres sont rassemblés dans les figures qui suivent (Figure 40, Figure 41, Figure 42).



Figure 40: Hypothèses % Recycler - Collecte des fins de vie

		% RECYCLER - MATIÈRE COLLECTÉE							
		SCÉNARIO A CIRCULARITÉ FAIBLE				SCÉNARIO B CIRCULARITÉ FORTE			
		ACTUEL	2030	2040	2050	ACTUEL	2030	2040	2050
Lithium	Véhicules électriques	0%	5%	10%	15%	0%	30%	60%	90%
Cobalt	Véhicules électriques	52%	57%	62%	67%	52%	58%	64%	70%
Platinoïdes	Véhicules hydrogène	76%	80%	85%	90%	76%	74%	72%	70%
Platinoïdes	Production d'hydrogène par électrolyse	76%	80%	85%	90%	76%	74%	72%	70%
Terres Rares	Éolien terrestre	0%	5%	10%	15%	0%	23%	47%	70%
Terres Rares	Éolien en mer	0%	5%	10%	15%	0%	23%	47%	70%
Terres Rares	Véhicules hydrogène	0%	5%	10%	15%	0%	23%	47%	70%
Terres Rares	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	5%	10%	15%	0%	23%	47%	70%
Cuivre	Nucléaire	29%	34%	39%	44%	29%	42%	56%	70%
Cuivre	Éolien terrestre	29%	34%	39%	44%	29%	42%	56%	70%
Cuivre	Éolien en mer	29%	34%	39%	44%	29%	42%	56%	70%
Cuivre	Solaire photovoltaïque	29%	34%	39%	44%	29%	42%	56%	70%
Cuivre	Réseaux électriques	29%	34%	39%	44%	29%	42%	56%	70%
Cuivre	Véhicules électriques	29%	34%	39%	44%	29%	42%	56%	70%
Cuivre	Véhicules hydrogène	29%	34%	39%	44%	29%	42%	56%	70%
Cuivre	Production d'hydrogène par électrolyse	29%	34%	39%	44%	29%	42%	56%	70%
Cuivre	Pompe à chaleur	29%	34%	39%	44%	29%	42%	56%	70%
Graphite	Véhicules électriques	0%	5%	10%	15%	0%	30%	60%	90%
Graphite	Véhicules hydrogène	0%	5%	10%	15%	0%	30%	60%	90%
Graphite	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	5%	10%	15%	0%	30%	60%	90%
Silicium	Solaire photovoltaïque	0%	5%	10%	15%	0%	30%	60%	90%
Aluminium	Bâtiments - neuf	51%	56%	61%	66%	51%	57%	64%	70%
Aluminium	Bâtiments - rénovation performante	51%	56%	61%	66%	51%	57%	64%	70%
Aluminium	Éolien terrestre	51%	56%	61%	66%	51%	57%	64%	70%
Aluminium	Éolien en mer	51%	56%	61%	66%	51%	57%	64%	70%
Aluminium	Solaire photovoltaïque	51%	56%	61%	66%	51%	57%	64%	70%
Aluminium	Réseaux électriques	51%	56%	61%	66%	51%	57%	64%	70%
Aluminium	Véhicules électriques	51%	56%	61%	66%	51%	57%	64%	70%
Aluminium	Véhicules hydrogène	51%	56%	61%	66%	51%	57%	64%	70%
Aluminium	Production d'hydrogène par électrolyse	51%	56%	61%	66%	51%	57%	64%	70%
Aluminium	Pompe à chaleur	51%	56%	61%	66%	51%	57%	64%	70%
Nickel	Nucléaire	66%	71%	76%	81%	66%	67%	69%	70%
Nickel	Géothermie profonde	66%	71%	76%	81%	66%	67%	69%	70%

% RECYCLER - MATIÈRE COLLECTÉE

SCÉNARIO A CIRCULARITÉ FAIBLE

SCÉNARIO B CIRCULARITÉ FORTE

		ACTUEL	2030	2040	2050	ACTUEL	2030	2040	2050
Nickel	Éolien terrestre	66%	71%	76%	81%	66%	67%	69%	70%
Nickel	Éolien en mer	66%	71%	76%	81%	66%	67%	69%	70%
Nickel	Véhicules électriques	66%	71%	76%	81%	66%	67%	69%	70%
Nickel	Véhicules hydrogène	66%	71%	76%	81%	66%	67%	69%	70%
Nickel	Production d'hydrogène par électrolyse	66%	71%	76%	81%	66%	67%	69%	70%
Nickel	Pompe à chaleur	66%	71%	76%	81%	66%	67%	69%	70%
Acier	Nucléaire	78%	82%	86%	90%	78%	82%	86%	90%
Acier	Géothermie profonde	78%	82%	86%	90%	78%	82%	86%	90%
Acier	Bâtiments - neuf	78%	82%	86%	90%	78%	82%	86%	90%
Acier	Bâtiments - rénovation performante	78%	82%	86%	90%	78%	82%	86%	90%
Acier	Biomasse solide	78%	82%	86%	90%	78%	82%	86%	90%
Acier	Biomasse gazeuse	78%	82%	86%	90%	78%	82%	86%	90%
Acier	Réseaux de chaleur	78%	82%	86%	90%	78%	82%	86%	90%
Acier	Éolien terrestre	78%	75%	73%	70%	78%	69%	59%	50%
Acier	Éolien en mer	78%	75%	73%	70%	78%	69%	59%	50%
Acier	Solaire photovoltaïque	78%	82%	86%	90%	78%	82%	86%	90%
Acier	Réseaux électriques	78%	82%	86%	90%	78%	82%	86%	90%
Acier	Véhicules électriques	78%	82%	86%	90%	78%	82%	86%	90%
Acier	Véhicules hydrogène	78%	75%	73%	70%	78%	82%	86%	90%
Acier	Production d'hydrogène par électrolyse	78%	75%	73%	70%	78%	82%	86%	90%
Acier	Pompe à chaleur	78%	82%	86%	90%	78%	75%	73%	70%
Béton	Nucléaire	6%	11%	16%	21%	6%	19%	32%	45%
Béton	Géothermie profonde	6%	11%	16%	21%	6%	19%	32%	45%
Béton	Bâtiments - neuf	6%	11%	16%	21%	6%	19%	32%	45%
Béton	Bâtiments - rénovation performante	6%	11%	16%	21%	6%	19%	32%	45%
Béton	Biomasse solide	6%	11%	16%	21%	6%	19%	32%	45%
Béton	Biomasse gazeuse	6%	11%	16%	21%	6%	19%	32%	45%
Béton	Réseaux de chaleur	6%	11%	16%	21%	6%	19%	32%	45%
Béton	Éolien terrestre	6%	11%	16%	21%	6%	12%	18%	24%
Béton	Éolien en mer	6%	11%	16%	21%	6%	12%	18%	24%
Béton	Solaire photovoltaïque	6%	11%	16%	21%	6%	19%	32%	45%
Béton	Réseaux électriques	6%	11%	16%	21%	6%	19%	32%	45%



Figure 41: Hypothèses % de rendement du processus de recyclage

% RENDEMENT DU PROCESSUS DE RECYCLAGE								
	SCÉNARIO A CIRCULARITÉ FAIBLE				SCÉNARIO B CIRCULARITÉ FORTE			
	ACTUEL	2030	2040	2050	ACTUEL	2030	2040	2050
Lithium	50%	57%	63%	70%	50%	63%	77%	90%
Cobalt	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
Platinoïdes	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
Terres Rares	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Cuivre	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%
Graphite	50%	57%	63%	70%	50%	63%	77%	90%
Silicium	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
Aluminium	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%
Nickel	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
Acier	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
Béton	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%

Figure 42: Hypothèses % Recycler - Matière fonctionnelle réutilisée

		% RECYCLER - MATIÈRE FONCTIONNELLE RÉUTILISÉE							
		SCÉNARIO A CIRCULARITÉ FAIBLE				SCÉNARIO B CIRCULARITÉ FORTE			
		ACTUEL	2030	2040	2050	ACTUEL	2030	2040	2050
Lithium	Véhicules électriques	0%	3%	7%	11%	0%	27%	54%	81%
Cobalt	Véhicules électriques	47%	51%	56%	61%	47%	52%	58%	63%
Platinoïdes	Véhicules hydrogène	53%	56%	60%	63%	53%	52%	50%	49%
Platinoïdes	Production d'hydrogène par électrolyse	53%	56%	60%	63%	53%	52%	50%	49%
Terres Rares	Éolien terrestre	0%	4%	8%	12%	0%	19%	37%	56%
Terres Rares	Éolien en mer	0%	4%	8%	12%	0%	19%	37%	56%
Terres Rares	Véhicules hydrogène	0%	4%	8%	12%	0%	19%	37%	56%
Terres Rares	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	4%	8%	12%	0%	19%	37%	56%
Cuivre	Nucléaire	28%	33%	38%	43%	28%	42%	55%	69%
Cuivre	Éolien terrestre	28%	33%	38%	43%	28%	42%	55%	69%
Cuivre	Éolien en mer	28%	33%	38%	43%	28%	42%	55%	69%
Cuivre	Solaire photovoltaïque	28%	33%	38%	43%	28%	42%	55%	69%
Cuivre	Réseaux électriques	28%	33%	38%	43%	28%	42%	55%	69%
Cuivre	Véhicules électriques	28%	33%	38%	43%	28%	42%	55%	69%
Cuivre	Véhicules hydrogène	28%	33%	38%	43%	28%	42%	55%	69%
Cuivre	Production d'hydrogène par électrolyse	28%	33%	38%	43%	28%	42%	55%	69%
Cuivre	Pompe à chaleur	28%	33%	38%	43%	28%	42%	55%	69%
Graphite	Véhicules électriques	0%	3%	7%	11%	0%	27%	54%	81%
Graphite	Véhicules hydrogène	0%	3%	7%	11%	0%	27%	54%	81%
Graphite	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	3%	7%	11%	0%	27%	54%	81%
Silicium	Solaire photovoltaïque	0%	4%	9%	14%	0%	27%	54%	81%
Aluminium	Bâtiments - neuf	50%	55%	60%	65%	50%	56%	62%	69%
Aluminium	Bâtiments - rénovation performante	50%	55%	60%	65%	50%	56%	62%	69%
Aluminium	Éolien terrestre	50%	55%	60%	65%	50%	56%	62%	69%
Aluminium	Éolien en mer	50%	55%	60%	65%	50%	56%	62%	69%
Aluminium	Solaire photovoltaïque	50%	55%	60%	65%	50%	56%	62%	69%
Aluminium	Réseaux électriques	50%	55%	60%	65%	50%	56%	62%	69%
Aluminium	Véhicules électriques	50%	55%	60%	65%	50%	56%	62%	69%
Aluminium	Véhicules hydrogène	50%	55%	60%	65%	50%	56%	62%	69%
Aluminium	Production d'hydrogène par électrolyse	50%	55%	60%	65%	50%	56%	62%	69%
Aluminium	Pompe à chaleur	50%	55%	60%	65%	50%	56%	62%	69%
Nickel	Nucléaire	59%	63%	68%	73%	59%	60%	62%	63%
Nickel	Géothermie profonde	59%	63%	68%	73%	59%	60%	62%	63%

% RECYCLER - MATIÈRE
FONCTIONNELLE RÉUTILISÉE

SCÉNARIO A
CIRCULARITÉ FAIBLE

SCÉNARIO B
CIRCULARITÉ FORTE

		ACTUEL	2030	2040	2050	ACTUEL	2030	2040	2050
Nickel	Éolien terrestre	59%	63%	68%	73%	59%	60%	62%	63%
Nickel	Éolien en mer	59%	63%	68%	73%	59%	60%	62%	63%
Nickel	Véhicules électriques	59%	63%	68%	73%	59%	60%	62%	63%
Nickel	Véhicules hydrogène	59%	63%	68%	73%	59%	60%	62%	63%
Nickel	Production d'hydrogène par électrolyse	59%	63%	68%	73%	59%	60%	62%	63%
Nickel	Pompe à chaleur	59%	63%	68%	73%	59%	60%	62%	63%
Acier	Nucléaire	70%	74%	77%	81%	70%	74%	77%	81%
Acier	Géothermie profonde	70%	74%	77%	81%	70%	74%	77%	81%
Acier	Bâtiments - neuf	70%	74%	77%	81%	70%	74%	77%	81%
Acier	Bâtiments - rénovation performante	70%	74%	77%	81%	70%	74%	77%	81%
Acier	Biomasse solide	70%	74%	77%	81%	70%	74%	77%	81%
Acier	Biomasse gazeuse	70%	74%	77%	81%	70%	74%	77%	81%
Acier	Réseaux de chaleur	70%	74%	77%	81%	70%	74%	77%	81%
Acier	Éolien terrestre	70%	68%	65%	63%	70%	62%	53%	45%
Acier	Éolien en mer	70%	68%	65%	63%	70%	62%	53%	45%
Acier	Solaire photovoltaïque	70%	74%	77%	81%	70%	74%	77%	81%
Acier	Réseaux électriques	70%	74%	77%	81%	70%	74%	77%	81%
Acier	Véhicules électriques	70%	74%	77%	81%	70%	74%	77%	81%
Acier	Véhicules hydrogène	70%	68%	65%	63%	70%	74%	77%	81%
Acier	Production d'hydrogène par électrolyse	70%	68%	65%	63%	70%	74%	77%	81%
Acier	Pompe à chaleur	70%	74%	77%	81%	70%	68%	65%	63%
Béton	Nucléaire	5%	9%	14%	19%	5%	17%	29%	41%
Béton	Géothermie profonde	5%	9%	14%	19%	5%	17%	29%	41%
Béton	Bâtiments - neuf	5%	9%	14%	19%	5%	17%	29%	41%
Béton	Bâtiments - rénovation performante	5%	9%	14%	19%	5%	17%	29%	41%
Béton	Biomasse solide	5%	9%	14%	19%	5%	17%	29%	41%
Béton	Biomasse gazeuse	5%	9%	14%	19%	5%	17%	29%	41%
Béton	Réseaux de chaleur	5%	9%	14%	19%	5%	17%	29%	41%
Béton	Éolien terrestre	5%	9%	14%	19%	5%	11%	16%	22%
Béton	Éolien en mer	5%	9%	14%	19%	5%	11%	16%	22%
Béton	Solaire photovoltaïque	5%	9%	14%	19%	5%	17%	29%	41%
Béton	Réseaux électriques	5%	9%	14%	19%	5%	17%	29%	41%

4.3.4 % Réemployer

Ces hypothèses concernent la part des composants et des pièces qui peuvent être réemployés.

Par construction, on a supposé que la somme % Recycler + % Réemployer ne pouvait excéder 90 %.

La Figure 43 réunit l'ensemble des hypothèses de réemploi pour chaque ressource dans chaque domaine pour les scénarios A et B.

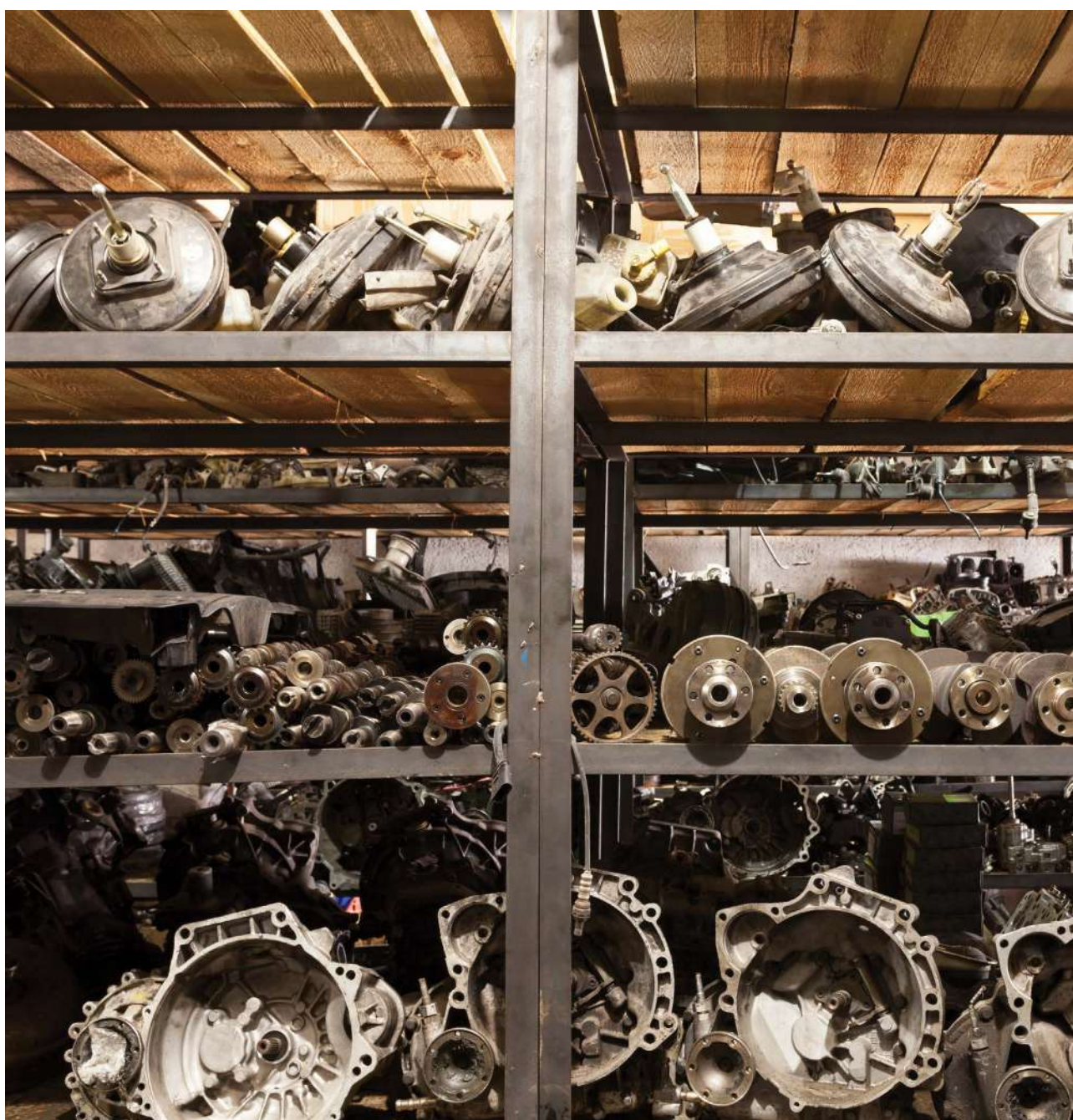


Figure 43: Hypothèses % Réemployer

		% REEMPLOYER							
		SCÉNARIO A CIRCULARITÉ FAIBLE				SCÉNARIO B CIRCULARITÉ FORTE			
		ACTUEL	2030	2040	2050	ACTUEL	2030	2040	2050
Lithium	Véhicules électriques	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Cobalt	Véhicules électriques	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Platinoïdes	Véhicules hydrogène	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Platinoïdes	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Terres Rares	Éolien terrestre	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Terres Rares	Éolien en mer	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Terres Rares	Véhicules hydrogène	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Terres Rares	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Cuivre	Nucléaire	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Cuivre	Éolien terrestre	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Cuivre	Éolien en mer	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Cuivre	Solaire photovoltaïque	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Cuivre	Réseaux électriques	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Cuivre	Véhicules électriques	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Cuivre	Véhicules hydrogène	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Cuivre	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Cuivre	Pompe à chaleur	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Graphite	Véhicules électriques	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Graphite	Véhicules hydrogène	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Graphite	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Silicium	Solaire photovoltaïque	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Aluminium	Bâtiments - neuf	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Aluminium	Bâtiments - rénovation performante	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Aluminium	Éolien terrestre	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Aluminium	Éolien en mer	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Aluminium	Solaire photovoltaïque	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Aluminium	Réseaux électriques	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Aluminium	Véhicules électriques	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Aluminium	Véhicules hydrogène	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Aluminium	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Aluminium	Pompe à chaleur	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Nickel	Nucléaire	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Nickel	Géothermie profonde	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%

		% REEMPLOYER							
		SCÉNARIO A CIRCULARITÉ FAIBLE				SCÉNARIO B CIRCULARITÉ FORTE			
		ACTUEL	2030	2040	2050	ACTUEL	2030	2040	2050
Nickel	Éolien terrestre	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Nickel	Éolien en mer	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Nickel	Véhicules électriques	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Nickel	Véhicules hydrogène	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Nickel	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Nickel	Pompe à chaleur	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Acier	Nucléaire	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acier	Géothermie profonde	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acier	Bâtiments - neuf	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acier	Bâtiments - rénovation performante	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acier	Biomasse solide	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acier	Biomasse gazeuse	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acier	Réseaux de chaleur	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acier	Éolien terrestre	0%	7%	13%	20%	0%	13%	27%	40%
Acier	Éolien en mer	0%	7%	13%	20%	0%	13%	27%	40%
Acier	Solaire photovoltaïque	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acier	Réseaux électriques	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acier	Véhicules électriques	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acier	Véhicules hydrogène	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acier	Production d'hydrogène par électrolyse	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acier	Pompe à chaleur	0%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	20%
Béton	Nucléaire	0%	0%	0%	0%	0%	3%	7%	10%
Béton	Géothermie profonde	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Béton	Bâtiments - neuf	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Béton	Bâtiments - rénovation performante	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Béton	Biomasse solide	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Béton	Biomasse gazeuse	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Béton	Réseaux de chaleur	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Béton	Éolien terrestre	0%	11%	22%	33%	0%	22%	44%	66%
Béton	Éolien en mer	0%	11%	22%	33%	0%	22%	44%	66%
Béton	Solaire photovoltaïque	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Béton	Réseaux électriques	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%





4.4 SCORES D'ÉVALUATION DES LEVIERS CIRCULAIRES PAR RESSOURCE

Les scores d'évaluation des maturités actuelles et des priorités d'efforts à venir sont fournis au Chapitre 2 pour les domaines Electrification (Figure 26) et Construction (Figure 33).

Une vue de ces scores par ressource est présentée dans la Figure 44.

Figure 44: Evaluation des leviers circulaires pour les ressources (maturité actuelle et priorité des efforts)

		Ressources															
		Moyenne des scores	Lithium	Cobalt	Platinoïdes	Terres Rares	Cuivre	Graphite	Silicium	Aluminium	Nickel	Acier	Béton	Bois-forêts	Agriculture	Déchets	SURFACES
Maturité actuelle 2020	Éviter	1.6	1	1	2	2	1	2	2	1	1	2	1	3	1	2	2
	Réduire	2.4	2	2	3	4	2	3	2	2	2	2	2	3	2	3	na
	Réemployer	2.3	1	2	1	2	4	1	2	4	3	2	2	2	4	2	na
	Recycler	3.6	1	3	5	2	5	5	2	5	5	4	4	4	4	3	2
	Écoconception	2.8	2	3	2	3	3	2	2	3	2	3	3	5	5	3	1
	Organisation filières et territoriale	3.1	3	3	4	2	3	4	3	3	4	4		3	2	4	2
	Digital	2.9	1	3	3	2	4	3	3	4	5	3	2	3	3	3	2
	Recherche & Développement et Innovation	3.1	4	4	4	4	2	4	3	2	2	3	3	4	2	2	na
	Réglementaire et économique	2.9	2	2	2	2	3	2	2	3	3	4	3	4	4	5	3
Maturité actuelle globale		2.7	1.9	2.6	2.9	2.6	3.0	2.9	2.3	3.0	3.0	3.0	2.5	3.4	3.0	3.0	2.0
Priorité des efforts à faire 2020-2050	Éviter	3.4	4	4	5	4	2	5	1	2	2	4	5	2	5	1	5
	Réduire	3.1	4	4	3	2	3	3	4	3	3	3	3	4	4	1	na
	Réemployer	3.9	3	4	4	3	4	3	4	4	4	4	4	5	3	5	na
	Recycler	3.9	5	5	2	5	4	2	4	4	4	3	3	5	3	5	5
	Ecoconception	3.5	5	5	4	3	4	4	4	4	3	5	5	1	1	1	3
	Organisation filières et territoriale	4.1	3	3	4	5	5	3	3	5	2	4	4	5	5	5	5
	Digital	2.9	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	4	3	3	3
	Recherche & Développement et Innovation	3.2	5	5	4	4	2	4	4	2	3	2	2	4	3	3	1
	Réglementaire et économique	2.7	4	4	3	3	2	3	3	2	2	2	3	3	3	1	3
Priorité d'efforts globale		3.4	4.0	4.1	3.6	3.6	3.2	3.3	3.1	3.2	2.9	3.3	3.6	3.7	3.3	2.8	3.6

4.5 HYPOTHÈSES SUR LES ÉNERGIES PRIMAIRES DISPONIBLES POUR L'USAGE EN BIOMASSES SOLIDES ET GAZEUSES

Les Figures 45, 46 et 47, détaillent respectivement les hypothèses de mobilisation des ressources Bois-Forêt, Agricoles et Déchets urbains et industriels (DUI) en tenant compte des autres usages. Ces hypothèses sont issues des travaux récents de l'Ademe⁴⁶.

La quatrième table (Figure 48) présente les hypothèses de ventilation de l'énergie primaire disponible vers l'utilisation en biomasse solide et en biomasse gazeuse, certaines ressources primaires pouvant être utilisées de plusieurs façons. La table de ventilation de l'énergie primaire disponible a été construite dans le cadre de cette étude de façon à correspondre aux mix des scénarios A et B.



⁴⁶ 2015 à 2022

Figure 45: Ressources Bois-Forêt ultimes, mobilisables et disponibles (TWh d'énergie primaire)

Gisement mobilisable en énergie primaire d'intrants - Bois-Forêt					
Ressources mobilisables	Unité	Actuel	2030	2040	2050
Ressources exploitables					
Récolte totale bois Métropole	millions m3	56.2	62.6	68.9	75.2
Récolte bois - hors forêts pour autoconsommation énergie	millions m3	4.2	4.2	4.2	4.2
Récolte bois - forêts	millions m3	52.0	58.3	64.7	71.0
1er niveau Récolte - Total	millions m3	55.8	62.6	68.9	75.2
Total Industrie	millions m3	30.3	33.4	36.6	39.7
dont bois d'œuvre BO	millions m3	20.0	21.9	23.9	25.8
dont bois d'industrie BI	millions m3	10.3	11.5	12.7	13.9
Total disponible pour énergie	millions m3	25.5	29.1	32.3	35.5
dont bois autoconsommé pour énergie	millions m3	16.9	12.6	8.3	4.0
dont disponible pour bois énergie BE	millions m3	8.6	16.5	24.0	31.5
1er niveau Récolte - Utilisation des ressources pour le 2e niveau Transformation					
BO Part pour Produits finis en % du 1er niveau	%	36%	36%	36%	36%
BO Part pour Connexes pour intrants BI en % du 1er niveau	%	18%	18%	18%	18%
BO Part pour Connexes pour BE énergie en % du 1er niveau	%	46%	46%	46%	46%
BO total des utilisations du 1er niveau	%	100%	100%	100%	100%
BI Part pour Produits finis en % du 1er niveau	%	70%	70%	70%	70%
BI Part pour Connexes pour BE énergie en % du 1er niveau	%	30%	30%	30%	30%
BI total des utilisations du 1er niveau	%	100%	100%	100%	100%
2nd niveau après Transformation - Total	millions m3	55.8	62.6	68.9	75.2
Total Industrie	millions m3	18.0	19.9	21.8	23.6
Produits finis BO	millions m3	7.2	7.9	8.6	9.3
Produits finis BI	millions m3	10.8	12.0	13.2	14.3
Total disponible pour Énergie	millions m3	37.8	42.7	47.1	51.6
Bois autoconsommé pour énergie	millions m3	16.9	12.6	8.3	4.0
Bois énergie BE	millions m3	8.6	16.5	24.0	31.5
Bois énergie issu de connexes BO BI	millions m3	12.3	13.6	14.8	16.1

Gisement mobilisable en énergie primaire d'intrants - Bois-Forêt

Ressources mobilisables	Unité	Actuel	2030	2040	2050
3e Niveau y compris déchets de fins de vie bois					
Production BO BI avec potentiel de fins de vie (3 à 50 ans plus tard) pour réutilisations	millions m3	18.0	19.9	21.8	23.6
Maximum récupérable pour BI panneaux et pour construction bâtiments (restockage CO2)	%	57%	55%	52%	50%
Maximum récupérable pour énergie	%	22%	28%	34%	40%
Total récupération (possible : >100% si déstockage accéléré des bâtiments construits depuis 100 ans)	%	79%	83%	86%	90%
Gisements additionnels fins de vie	millions m3	14.2	16.4	18.8	21.3
Potentiel pour BI panneaux et construction	millions m3	10.3	10.9	11.4	11.8
Potentiel disponible pour BE énergie	millions m3	4.0	5.6	7.4	9.5
3e et dernier niveau y compris fins de vie - Total	millions m3	70.0	79.0	87.7	96.5
Total Industrie	millions m3	28.3	30.7	33.1	35.4
dont bois d'œuvre BO	millions m3	7.2	7.9	8.6	9.3
dont bois d'industrie BI	millions m3	21.1	22.8	24.5	26.2
Total disponible pour Énergie	millions m3	41.8	48.2	54.5	61.0
dont bois autoconsommé pour énergie	millions m3	16.9	12.6	8.3	4.0
dont bois autres	millions m3	24.9	35.6	46.2	57.0
3e et dernier niveau y compris fins de vie - Total	TWh	189.1	213.3	236.8	260.6
Total Industrie	TWh	76.3	83.0	89.5	95.7
dont bois d'œuvre BO	TWh	19.4	21.3	23.2	25.1
dont bois d'industrie BI	TWh	56.8	61.7	66.3	70.6
Total disponible pour Énergie	TWh	112.8	130.3	147.3	164.9
dont bois autoconsommé pour énergie	TWh	45.6	34.0	22.4	10.8
dont bois autres	TWh	67.1	96.3	124.8	154.0

Sources : [ADEME 2021a], analyses et hypothèses Capgemini Invent

Figure 46: Ressources Agriculture ultimes, mobilisables et disponibles (TWh d'énergie primaire)

Gisement mobilisable en énergie primaire d'intrants - Agriculture					
Ressources mobilisables	Unité	Actuel	2030	2040	2050
Gisement ultime					
MtMS - Agriculture d'origine végétale - Cultures intermédiaires	MtMS	2	16	29	41
MtMS - Agriculture d'origine végétale - Résidus de cultures	MtMS	62	62	62	62
MtMS - Agriculture d'origine végétale - Herbe et fourrages	MtMS	53	53	53	53
MtMS - Agriculture d'origine animale - Effluents d'élevage	MtMS	15	15	15	15
Taux de mobilisation					
Agriculture d'origine végétale - Cultures intermédiaires	%	51%	51%	51%	51%
Agriculture d'origine végétale - Résidus de cultures	%	21%	21%	21%	21%
Agriculture d'origine végétale - Herbe et fourrages	%	11%	11%	11%	11%
Agriculture d'origine animale - Effluents d'élevage	%	67%	67%	67%	67%
Gisement disponible en énergie primaire		73	91	108	123
TWh PCS - Agriculture d'origine végétale - Cultures intermédiaires	TWh PCS	2.4	19.6	36.7	51.4
TWh PCS - Agriculture d'origine végétale - Résidus de cultures	TWh PCS	30.9	30.9	30.9	31.1
TWh PCS - Agriculture d'origine végétale - Herbe et fourrages	TWh PCS	13.0	13.0	13.0	13.1
TWh PCS - Agriculture d'origine végétale - Total	TWh PCS	46	64	81	96
TWh PCS - Agriculture d'origine animale - Effluents d'élevage	TWh PCS	27	27	27	27

Source : [ADEME 2018a]

Figure 47: Ressources Déchets urbains et Industriels ultimes, mobilisables et disponibles (TWh d'énergie primaire)

Gisement mobilisable en énergie primaire d'intrants - Déchets urbains et industriels					
Ressources mobilisables	Unité	Actuel	2030	2040	2050
Gisement ultime					
Mt - Déchets triés - Déchets des ménages organiques	Mt	6.79	6.79	6.79	6.79
Mt - Déchets triés - Boues des STEP urbaines	Mt	16.56	16.56	16.56	42.78
Mt - Déchets triés - Coproduits IAA autres	Mt	9.30	9.30	9.30	9.30
Mt - Déchets triés - Liqueurs noires	Mt	14.00	14.00	14.00	14.00
Mt - Déchets triés - Digestat de méthanisation	Mt	—	—	—	—
Mt - Déchets triés - Boues de curage/ dragage et boues industrielles	Mt	140.0	140.0	140.0	140.0
Mt - Déchets triés - Autres	Mt	16.6	16.6	16.6	16.6
<i>Mt - Déchets triés - Déchets des espaces verts</i>	<i>Mt</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>
<i>Mt - Déchets triés - Déchets de la restauration</i>	<i>Mt</i>	<i>0.50</i>	<i>0.50</i>	<i>0.50</i>	<i>0.50</i>
<i>Mt - Déchets triés - Déchets de la distribution</i>	<i>Mt</i>	<i>0.84</i>	<i>0.84</i>	<i>0.84</i>	<i>0.84</i>
<i>Mt - Déchets triés - Herbes bord de route</i>	<i>Mt</i>	<i>5.00</i>	<i>5.00</i>	<i>5.00</i>	<i>5.00</i>
<i>Mt - Déchets triés - Coproduits IAA</i>	<i>Mt</i>	<i>9.30</i>	<i>9.30</i>	<i>9.30</i>	<i>9.30</i>
Mt - Déchets résiduels - ISDND	Mt	—	—	—	—
Mt - Déchets résiduels - CSR	Mt	0.35	3.50	10.68	17.86
Taux de mobilisation					
Mt - Déchets triés - Déchets des ménages organiques	%	28%	28%	28%	28%
Mt - Déchets triés - Boues des STEP urbaines	%	32%	32%	32%	32%
Mt - Déchets triés - Coproduits IAA autres	%	10%	10%	10%	10%
Mt - Déchets triés - Liqueurs noires	%	100%	100%	100%	100%
Mt - Déchets triés - Digestat de méthanisation	%	10%	10%	10%	10%
Mt - Déchets triés - Boues de curage/ dragage et boues industrielles	%	13%	13%	13%	13%
Mt - Déchets triés - Autres					
<i>Mt - Déchets triés - Déchets des espaces verts</i>	%	<i>10%</i>	<i>10%</i>	<i>10%</i>	<i>10%</i>
<i>Mt - Déchets triés - Déchets de la restauration</i>	%	<i>40%</i>	<i>40%</i>	<i>40%</i>	<i>40%</i>
<i>Mt - Déchets triés - Déchets de la distribution</i>	%	<i>79%</i>	<i>79%</i>	<i>79%</i>	<i>79%</i>
<i>Mt - Déchets triés - Herbes bord de route</i>	%	<i>50%</i>	<i>50%</i>	<i>50%</i>	<i>50%</i>
<i>Mt - Déchets triés - Coproduits IAA</i>	%	<i>10%</i>	<i>10%</i>	<i>10%</i>	<i>10%</i>
Mt - Déchets résiduels - ISDND	%	100%	100%	100%	100%
Mt - Déchets résiduels - CSR	%	22%	42%	62%	82%

Gisement mobilisable en énergie primaire d'intrants - Déchets urbains et industriels

Ressources mobilisables	Unité	Actuel	2030	2040	2050
Gisement disponible en énergie primaire		29.9	42.2	69.5	109.3
TWh - Déchets triés - Déchets des ménages organiques	TWh PCS	2.50	2.50	2.50	2.50
TWh - Déchets triés - Boues des STEP urbaines	TWh PCS	0.60	0.60	0.60	1.55
TWh - Déchets triés - Coproduits IAA autres	TWh PCS	2.45	2.45	2.45	2.45
TWh - Déchets triés - Liqueurs noires	TWh PCS	7.98	7.98	7.98	7.98
TWh - Déchets triés - Digestat de méthanisation	TWh PCS	0.42	7.11	13.81	20.50
TWh - Déchets triés - Boues de curage/ dragage et boues industrielles	TWh PCS	8.02	8.02	8.02	8.02
TWh - Déchets triés - Autres	TWh PCS	5.12	5.12	5.12	5.12
<i>TWh - Déchets triés - Déchets des espaces verts</i>	<i>TWh PCS</i>	<i>0.01</i>	<i>0.01</i>	<i>0.01</i>	<i>0.01</i>
<i>TWh - Déchets triés - Déchets de la restauration</i>	<i>TWh PCS</i>	<i>0.40</i>	<i>0.40</i>	<i>0.40</i>	<i>0.40</i>
<i>TWh - Déchets triés - Déchets de la distribution</i>	<i>TWh PCS</i>	<i>0.16</i>	<i>0.16</i>	<i>0.16</i>	<i>0.16</i>
<i>TWh - Déchets triés - Herbes bord de route</i>	<i>TWh PCS</i>	<i>2.10</i>	<i>2.10</i>	<i>2.10</i>	<i>2.10</i>
<i>TWh - Déchets triés - Coproduits IAA</i>	<i>TWh PCS</i>	<i>2.45</i>	<i>2.45</i>	<i>2.45</i>	<i>2.45</i>
TWh - Déchets résiduels - ISDND	TWh PCS	2.50	2.50	2.50	2.50
TWh - Déchets résiduels - CSR	TWh PCS	0.30	5.88	26.49	58.66

Sources : [ADEME 2018a], [ONRB 2020a], [ADEME 2021a], [FED 2019a], GRDF, analyse Capgemini Invent

Figure 48: Ventilation de l'énergie primaire disponible et taux d'utilisation en biomasses solides et gazeuses

ÉNERGIE PRIMAIRE DISPONIBLE - Table de ventilation par catégories de destination						
ACTUEL - Énergie primaire disponible (TWh PCS)						
Ressource primaire disponible - Familles et segments		Total	Chaleur	Pyro-gazéification	Méthanisation	Gazéification hydrothermale
Actuel	Utilisation pour le Besoin SNBC (TWh PCS)	102	100	0	3	0
Actuel	Ressource primaire disponible (TWh PCS)	216	121	0	87	8
Actuel	% d'utilisation de la ressource primaire disponible	47%	82%	0%	3%	0%
Autres déchets	Déchets triés - Déchets des ménages organiques	2.5	0.0	NA	2.5	NA
Autres déchets	Déchets triés - Boues des STEP urbaines	0.6	NA	NA	0.6	0.0
Autres déchets	Déchets triés - Coproduits IAA autres	2.4	NA	NA	2.4	0.0
Autres déchets	Déchets triés - Liqueurs noires	8.0	8.0	NA	NA	0.0
Autres déchets	Déchets triés - Digestat de méthanisation	0.4	NA	NA	NA	0.4
Autres déchets	Déchets triés - Boues de curage/ dragage et boues industrielles	8.0	NA	NA	NA	8.0
Autres déchets	Déchets triés - Autres	5.1	0.0	NA	5.1	NA
Autres déchets	Déchets résiduels - ISDND	2.5	NA	NA	2.5	NA
Total Autres déchets	Total Autres déchets	29.6	8.0	0.0	13.2	8.4
CSR	Déchets résiduels - CSR	0.3	0.3	0.0	NA	NA
Total CSR	Total CSR	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
Agricole	Agriculture d'origine végétale	46.4	NA	0.0	46.4	NA
Agricole	Agriculture d'origine animale - Effluents d'élevage	27.0	NA	NA	27.0	0.0
Total Agricole	Total agriculture	73.4	0.0	0.0	73.4	0.0
Bois-forêts	Bois-forêts	112.8	112.8	0.0	NA	NA
Total bois-forêts	Total bois-forêts	112.8	112.8	0.0	0.0	0.0

ÉNERGIE PRIMAIRE DISPONIBLE - Table de ventilation par catégories de destination

Scénario A 2050 - Énergie primaire disponible (TWh PCS)

Ressource primaire disponible - Familles et segments		Total	Chaleur	Pyro-gazéification	Méthanisation	Gazéification hydro-thermale
2050	Utilisation pour le Besoin SNBC (TWh PCS)	301	103	85	113	0
2050	Ressource primaire disponible (TWh PCS)	397	124	99	137	37
2050	% d'utilisation de la ressource primaire disponible	76%	83%	85%	83%	0%
Autres déchets	Déchets triés - Déchets des ménages organiques	2.5	0.0	NA	2.5	NA
Autres déchets	Déchets triés - Boues des STEP urbaines	1.5	NA	NA	1.5	0.0
Autres déchets	Déchets triés - Coproduits IAA autres	2.4	NA	NA	2.4	0.0
Autres déchets	Déchets triés - Liqueurs noires	8.0	0.0	NA	NA	8.0
Autres déchets	Déchets triés - Digestat de méthanisation	20.5	NA	NA	NA	20.5
Autres déchets	Déchets triés - Boues de curage/ dragage et boues industrielles	8.0	NA	NA	NA	8.0
Autres déchets	Déchets triés - Autres	5.1	0.0	NA	5.1	NA
Autres déchets	Déchets résiduels - ISDND	2.5	NA	NA	2.5	NA
Total Autres déchets	Total Autres déchets	50.6	0.0	0.0	14.1	36.5
CSR	Déchets résiduels - CSR	58.7	8.8	49.9	NA	NA
Total CSR	Total CSR	58.7	8.8	49.9	0.0	0.0
Agricole	Agriculture d'origine végétale	95.5	NA	0.0	95.5	NA
Agricole	Agriculture d'origine animale - Effluents d'élevage	27.0	NA	NA	27.0	0.0
Total Agricole	Total agriculture	122.5	0.0	0.0	122.5	0.0
Bois-forêts	Bois-forêts	164.9	115.4	49.5	NA	NA
Total bois-forêts	Total bois-forêts	164.9	115.4	49.5	0.0	0.0

ÉNERGIE PRIMAIRE DISPONIBLE - Table de ventilation par catégories de destination

Scénario B 2050 - Énergie primaire disponible (TWh PCS)

Ressource primaire disponible - Familles et segments		Total	Chaleur	Pyro-gazéification	Méthanisation	Gazéification hydro-thermale
2050	Utilisation pour le Besoin SNBC (TWh PCS)	382	94	115	137	36
2050	Ressource primaire disponible (TWh PCS)	397	108	116	137	37
2050	% d'utilisation de la ressource primaire disponible	96%	88%	99%	100%	99%
Autres déchets	Déchets triés - Déchets des ménages organiques	2.5	0.0	NA	2.5	NA
Autres déchets	Déchets triés - Boues des STEP urbaines	1.5	NA	NA	1.5	0.0
Autres déchets	Déchets triés - Coproduits IAA autres	2.4	NA	NA	2.4	0.0
Autres déchets	Déchets triés - Liqueurs noires	8.0	0.0	NA	NA	8.0
Autres déchets	Déchets triés - Digestat de méthanisation	20.5	NA	NA	NA	20.5
Autres déchets	Déchets triés - Boues de curage/ dragage et boues industrielles	8.0	NA	NA	NA	8.0
Autres déchets	Déchets triés - Autres	5.1	0.0	NA	5.1	NA
Autres déchets	Déchets résiduels - ISDND	2.5	NA	NA	2.5	NA
Total Autres déchets	Total Autres déchets	50.6	0.0	0.0	14.1	36.5
CSR	Déchets résiduels - CSR	58.7	8.8	49.9	NA	NA
Total CSR	Total CSR	58.7	8.8	49.9	0.0	0.0
Agricole	Agriculture d'origine végétale	95.5	NA	0.0	95.5	NA
Agricole	Agriculture d'origine animale - Effluents d'élevage	27.0	NA	NA	27.0	0.0
Total Agricole	Total agriculture	122.5	0.0	0.0	122.5	0.0
Bois-forêts	Bois-forêts	164.9	98.9	65.9	NA	NA
Total bois-forêts	Total bois-forêts	164.9	98.9	65.9	0.0	0.0

Sources : Cf sources précédentes, hypothèses de ventilations par Capgemini Invent

4.6 APPORTS, LIMITES ET PISTES D'APPROFONDISSEMENT DE L'ÉTUDE

Pour la première fois, cette étude propose une approche intégrée de la transition bas carbone circulaire. Comme toute première exploration, elle a aussi des limites, assumées, et laisse ouverte des pistes d'approfondissement pour les parties prenantes, publiques et privées, des différents sujets abordés.

Par souci de clarté et de transparence, la Figure 49 résume les apports de cette étude au corpus de connaissances et en expose les limites, qui pourront faire l'objet de travaux complémentaires.

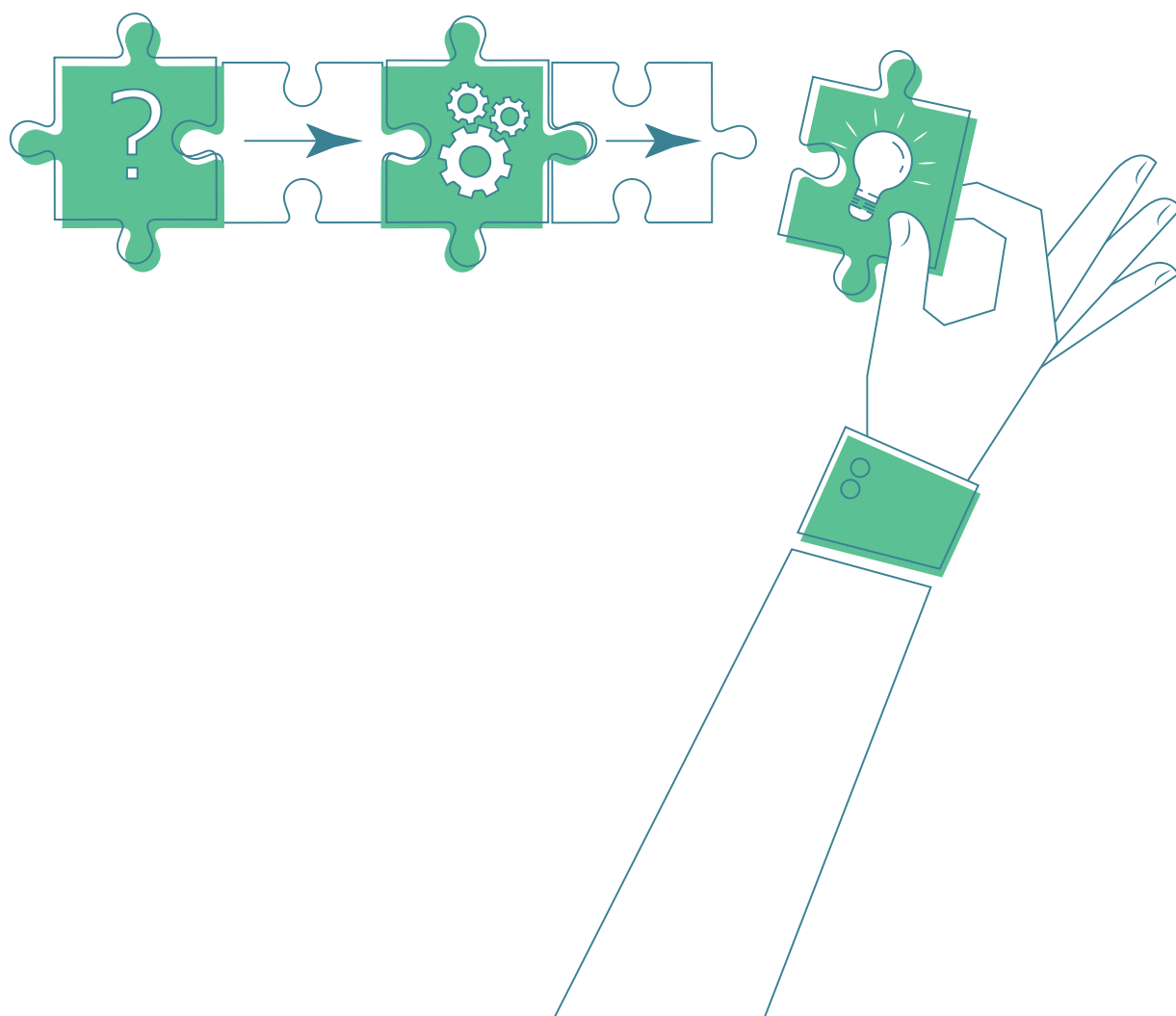


Figure 49: Apports, limites et pistes d'approfondissement de l'étude

Apports de l'étude	Limites et Pistes d'approfondissement par les parties prenantes
Une des premières études intégrées sur la transition bas carbone circulaire, qui aborde ensemble : • 15 domaines de la SNBC • 14 ressources fondamentales • les fins de vie et les besoins en ressources bruts • les flux circulaires ERRR (Éviter, Réduire, Recycler, Réemployer) • les fins de vie et les besoins en ressources nets • un chiffrage en volumes (tonnes) • un chiffrage en valeur (euros ou euros d'importation pour les métaux et minéraux) • un chiffrage de la criticité (euros.criticité) • des ordres de mérite (par kWh, kilomètre, m²)	Il appartient aux acteurs d'approfondir les méthodes et les chiffres sur la base de leur connaissance fine de leur secteur : • Syndicats professionnels • Entreprises privées et publiques • Institutions académiques • Etat, collectivités et agences spécialisées Ayant fait l'objet de larges approximations, les chiffres et les hypothèses gagneront à être précisés par ceux qui les connaissent le mieux. Le périmètre des domaines et des ressources pourra être complété.
Criticité L'étude propose une approche simple de la criticité en trois temps : • Score (de 1 à 5) • Impact (de 1 à 100) • Euros.criticité Cette approche présente les intérêts suivants : • Croiser valeur économique et criticité • Evaluer les ordres de mérite en termes de criticité matière des solutions envisagées par kWh, par kilomètre et par m² • Quantifier la criticité matière de la stratégie bas carbone à l'échelle nationale sur plusieurs décennies • La criticité peut être multicritère, ou zoomée sur la seule dimension, stratégique ou socio-environnementale.	Evaluer, adapter, généraliser l'approche L'Etat-stratège doit-il normer la méthode pour impulser les bons signaux dans l'économie ? Scores : Par souci de simplicité en première approche, les scores de criticité sont une moyenne simple des 6 dimensions considérées. Faudrait-il pondérer différemment ces dimensions en accordant, par exemple, davantage d'importance à l'aspect socio-environnemental. Sur ce thème, adopter une règle normative au niveau de l'Etat faciliterait la prise de décision publique. Criticité et euros.criticité : L'approche simple de l'impact sur une échelle de 1 à 100 et son croisement avec la valeur économique est-elle suffisante pour inclure ce critère dans les business plans et influencer la prise de décision ? Sur ces sujets, faut-il normaliser une approche pour généraliser la prise en compte de la criticité des ressources dans les stratégies publiques et privées ? Les résultats et merit orders sont nécessairement sensibles aux coefficients adoptés. L'Etat doit-il normer les coefficients après consultation des acteurs économiques et après s'être doté d'une stratégie et de priorités en termes de ressources et de domaines ?

Choix des domaines :

Une partie significative, mais non exhaustive, des grands domaines de la transition bas carbone a été couverte.

Choix des ressources

L'évaluation porte sur un échantillon de ressources fondamentales, représentatif des enjeux et des contraintes qui devront être traités au cours de la transition bas carbone.

Choix vertueux de traiter chaque domaine indépendamment : les fins de vie recyclées et réemployées nourrissent les besoins du même domaine bas carbone.

Étendre l'analyse à des domaines importants exclus du périmètre de l'étude, par exemple :

- Stations et prises de recharge pour la mobilité
- Biomasses liquides
- Synfuels liquides aériens et maritimes
- Solutions pour l'industrie (acier, ciment...)
- Plastiques
- Solutions pour les équipements fossiles et thermiques renouvelables (véhicules thermiques, centrales gaz/charbon, chaudières...)

Compléter avec les ressources importantes, par exemple :

- Surfaces (artificialisation vs co-usages et réutilisation)
- Ressources spécifiques importantes pour chaque domaine

Les ressources recyclées et réemployées peuvent nourrir d'autres domaines.

L'énorme pan des équipements fossiles n'est pas traité (véhicules, centrales, chaufferies, raffineries, etc). Il constitue une mine de ressources de premier ordre.

Intégrer l'évaluation des fins de vie et des déconstructions de technologies et d'équipements obsolètes.

Ratios matières par technologies

L'étude couvre un nombre important de domaines en s'appuyant sur les ratios issus d'études préexistantes, comme l'étude SURFER, et d'évaluations propres à Capgemini Invent.

Elle prend parfois en compte les proportions entre sous-technologies (par exemple, supports et parties génératrices dans l'éolien, le photovoltaïque)

Les études existantes proposent des évaluations encore très partielles, ou sur la base de publications scientifiques qui datent parfois de plusieurs années. Les entreprises, syndicats professionnels et agences de l'Etat sont les plus indiqués pour préciser les futures parts de marché et les ratios par sous-technologies.

Exemples :

- Electrolyseurs : SURFER ne prend pas en compte le béton de la centrale.
- Méthanation en complément de méthanisation : seuls ont été pris en compte le besoin en hydrogène, en électrolyseurs, en électricité et en réseaux électriques. La plateforme pour la méthanation ajouterait probablement 10 % à 30 % de béton et d'acier par rapport à une installation classique de méthanisation.

Approche additionnelle

L'étude évalue les quantités de matière additionnelles nécessaires entre 2020 et 2050.

Par exemple, pour l'accroissement de la taille des réseaux, les volumes additionnels de matière sont divisés par la quantité additionnelle d'énergie acheminée. Les réseaux électriques et de chaleur ont été évalués. Le réseau de gaz, qui connaît une réduction des volumes acheminés, a été comptabilisé pour une valeur nulle. Il y a en général peu d'informations disponibles chez les opérateurs de transport et de distribution sur ce sujet.

L'étude prend en compte la durée de vie et le marché de remplacement avec un mode de calcul simplifié sur la période 2020-2050.

Approche absolue

L'approche absolue peut manquer, par exemple pour les réseaux : quantité de matière contenue dans la totalité de l'équipement existant et futur, prise en compte des travaux sur toute la durée de vie, du remplacement en fin de vie, division par la totalité des TWh transportés.

Quantifier l'approche additionnelle et l'approche absolue :

- Approche additionnelle : affiner le marché initial en fonction de l'âge du parc, affiner le marché de remplacement sur trente ans.
- Approche absolue, car elle apporte un complément de connaissance indispensable et fixe les repères sur les longues durées. Traiter l'ensemble des réseaux électricité, chaleur, gaz, en prenant plus finement en compte les réfections, renforcements, fermetures/fins de vie et ouvertures, par exemple, de raccordements d'installations renouvelables.
- Prendre en compte la réparation, le maintien en condition opérationnelle, le nombre d'équipements changés, qui ajoutent des besoins en ressources.

Euros

L'étude a évalué les prix sur quatre périodes et a pris la moyenne.

L'étude présente la valeur à l'import pour les métaux et minéraux. On a choisi les valeurs des minerais pour l'acier et l'aluminium, et la valeur de commodité du métal ou du minéral pour les autres.

Mettre à jour régulièrement les valeurs ou, au contraire, établir des valeurs normatives pour permettre la décision publique sur une base de référence commune.

Définir les valeurs pour les fins de vies et les valeurs des flux circulaires. L'étude prend par défaut la valeur de marché des ressources.

Biomasses solides et gazeuses

L'étude a intégré les potentiels primaires ultimes et disponibles sur les trois périmètres Bois-Forêt, Agriculture et Déchets urbains et industriels issus des dernières études de référence.

Elle a établi une matrice de ventilation des potentiels disponibles vers les usages biomasse solide et gazeux qui prend en compte les contraintes subtiles de concurrence entre combustion, pyrogazéification, méthanisation et gazéification hydrothermale, ainsi que leurs rendements.

Mettre plus en évidence les marges de manœuvre liées à l'évolution des régimes d'alimentation sur la souveraineté alimentaire, mais aussi énergétique et matière. L'étude Transition(s) 2050 de l'ADEME semble indiquer que chaque réduction de 10 % de l'alimentation carnée libère 6 % de surfaces à répartir entre les usages.

En méthanisation, la définition du rendement, pris par défaut égal à 1, et du pouvoir méthanogène primaire ne semble pas établie dans les méthodes et tableaux statistiques. Clarifier ces aspects pourrait permettre de gagner quelques % et TWh sur une filière à fort volume et fort enjeu.

Niveaux de maturité technologique (TRL, BRL)

Elaborer d'autres mix liquides, gazeux et solides qui soulagent l'électrification et les importations minérales, et qui développent les activités économiques autour de la biomasse, dans un nouveau modèle industriel préservant, voire restaurant, la biodiversité.

L'étude suppose que les technologies seront disponibles à un coût compatible avec les équilibres économiques du moment.

Dans le Scénario B, les technologies de stockage d'électricité et d'hydrogène deviennent recyclables, même pour des ressources comme le lithium et le graphite, ce qui n'est pas le cas actuellement.

Dans le même ordre d'idée, la pyrogazéification (dès 2030), puis la gazéification hydrothermale (vers 2040) atteignent des TRL élevés.

Temporalités

L'étude modélise les jalons 2020, 2030, 2040 et 2050, mais de façon linéaire (simplification), sauf dans certains cas (apparition de la pyrogazéification vers 2030-2040, de la gazéification hydrothermale vers 2040-2050).

Des scénarios plus prudents sur les maturités et les disponibilités des technologies pourront être évalués.

Chaque filière pourra approfondir ses propres trajectoires, avec ambition mais réalisme.

Chiffres actuels

Des hypothèses ont été prises sur la base des années pré-covid (souvent 2017 à 2019).

Cela a permis d'établir des « multiples » d'augmentation des besoins en ressources nécessaires par la transition bas carbone par rapport à aujourd'hui.

Le point de départ a été compliqué en 2020 avec la crise du covid, puis ses effets rebonds en 2021, puis la crise ukrainienne et le covid en Asie début 2022. Les sources varient également. Par exemple, Transition(s) 2050 prend à plusieurs endroits 2015 comme année de départ pour la comptabilisation de la construction.

Le calage du point de départ 2020 pourra être amélioré par les acteurs.



4.7 BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages

CHEVALIER J.-M., DERDEVET M., GEOFFRON P., *L'avenir énergétique : cartes sur table*, Gallimard, février 2012.

CHEVALIER J.-M., *Les grandes batailles de l'énergie*, Gallimard, octobre 2004.

FAVENNEC J.-P., *Géopolitique de l'énergie. Besoins, ressources, échanges mondiaux*, IFP Publications, septembre 2009.

FIZAIN F., *Les métaux rares : opportunités ou menaces. Enjeux et perspectives associés à la transition énergétique*, IFP Publications, novembre 2020.

LEVY J.-C., *Economie circulaire : l'intelligence des limites. Système terre, système urbain, écosystèmes*, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, janvier 2022.

LEVY J.-C., *Economie « circulaire » des routes de la soie, dérouté des empires*, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, janvier 2020.

LEVY J.-C., *L'économie circulaire : l'urgence écologique ? Monde en transe, Chine en transit*, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, janvier 2010.

YERGIN D., *New map : energy, climate and the clash of nations*, Penguin Press, septembre 2020.

Rapports institutionnels

[ADEME 2015a], ADEME, FCBA, *Évaluation du gisement de déchets bois et son positionnement dans la filière bois/bois énergie*, Avril 2015

[ADEME 2016a], IGN, ADEME, FCBA, *Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035*, Février 2016

[ADEME 2016b], ADEME, *Mobilisation de la biomasse agricole : état de l'art et analyse prospective*, Novembre 2016

[ADEME 2017a], ADEME, *ADEME 2035-2050*, Octobre 2017

[ADEME 2017b], ADEME, *Définition d'orientations prioritaires de recherche-développement pour le développement de compétences françaises de recyclage des métaux critiques*, Juin 2017

[ADEME 2018a], ADEME, *Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ?*, Janvier 2018

[ADEME 2018b], ADEME, *54 exemples d'installations biomasse en entreprise*, Septembre 2018

[ADEME 2018c], ADEME, *Agriculture et énergies renouvelables : contributions et opportunités pour les exploitations agricoles*, Février 2018

[PIPAME 2013a], PIPAME, *Enjeux économiques des métaux stratégiques pour les filières automobile et aéronautique. Analyses prospectives par métal*, Mars 2013

[ADEME 2019a], ADEME, *Analyse du cycle de vie des flux de déchets recyclés sur le territoire français*, Décembre 2019

[ADEME 2019b], ADEME TBC CSTB, *Prospectives 2035 et 2050 de consommation de matériaux pour la construction neuve et la rénovation*, Décembre 2019

[ADEME 2019c], ADEME, *Les technologies innovantes de valorisation des CSR*, Septembre 2019

[ADEME 2020a], ADEME, *Transition industrielle - Prospective énergie matière, vers un outil de modélisation des niveaux de production*, Mai 2020

[ADEME 2020b], ADEME, *Déchets - Chiffres clé Edition 2020*, Septembre 2020

[ADEME 2020c], ADEME, *Empreintes sol, énergie et carbone de l'alimentation*, Décembre 2020

[ADEME 2021a], ADEME, *Transition(s) 2050*, Novembre 2021

[ADEME 2021b], ADEME, *Modecom™ 2017 Campagne nationale de caractérisation des déchets ménagers et assimilés*, Mars 2021

[ADEME 2021c], ADEME, *Forêts et usages du bois dans l'atténuation du changement climatique*, Avril 2021

[ADEME 2021d], ADEME, *Etude de préfiguration de la filière REP Produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment*, Mars 2021

[ADEME 2022a], ADEME, *Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique*, Février 2022

[ADEME 2022b], ADEME, *Prospective - Transitions 2050 - Feuilleton Mix électrique*, Février 2022

[ADEME 2022c], ADEME, *Modélisation et optimisation des mix électriques français et européen sur la période 2020-2060*, Février 2022

[ADEME 2022d], ADEME, *Bilan national du recyclage 2010-2019*, Janvier 2022

[AGRESTE 2021a], AGRESTE, *Synthèses conjoncturelles - commerce extérieur bois et dérivés*, Mai 2021

[ANCRE 2015a], Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie, *Ressources minérales et énergie*, Juin 2015

[ARA 2021a], Région Auvergne-Rhône-Alpes, ID Friches, Octobre 2021

[BRGM 2019a], BRGM, Le cuivre : revue de l'offre mondiale en 2019, Septembre 2020

[CARB 2021a], Carbone 4, L'État français se donne-t-il les moyens de son ambition climat ?, Février 2021

[CER 2021a], CEREMA, Les déterminants de la consommation d'espaces 2009-2019, Avril 2021

[CESE 2019a], Conseil économique, social et environnemental, La dépendance aux métaux stratégiques : quelles solutions pour l'économie ?, Janvier 2019

[CGE 2019a], Conseil général de l'économie, Analyse de la vulnérabilité d'approvisionnement en matières premières des entreprises françaises, Mars 2019

[CNI 2020a], CNI, Développement d'une filière intégrée de recyclage des batteries lithium, Février 2020

[CNR 2018a], CNR, Observatoire économique du transport routier de marchandise, Enquête Longue Distance 2017, Avril 2018

[CSNM 2019a], Collectif Scientifique National Méthanisation, Le pouvoir méthanogène des intrants de méthanisation, Janvier 2019

[CSTB 2022a], CSTB, L'économie circulaire au CSTB, Janvier 2022

[CSTB 2022b], CSTB, Comité de prospective, Imaginons ensemble les bâtiments de demain, Janvier 2022

[DATALAB 2020a], MTE DATALAB, Chiffres clés des énergies renouvelables Edition 2020, Juillet 2020

[DATALAB 2020b], MTE DATALAB, Chiffres clés de l'énergie Edition 2020, Septembre 2020

[DATALAB 2020c], MTE DATALAB, Bilan annuel des transports en 2019 : bilan de la circulation, Novembre 2020

[DATALAB 2021a], MTE DATALAB, Chiffres clés des énergies renouvelables Edition 2021, Juillet 2021

[DATALAB 2021b], MTE DATALAB, Chiffres clés de l'énergie Edition 2021, Septembre 2021

[DATALAB 2021c], MTE DATALAB, Bilan 2018 de la production de déchets en France, Juin 2021

[DGEC 2015a], DGEC, Scénarios prospectifs Energie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035, Septembre 2015

[DGEC 2020a], DGEC, Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat, Janvier 2020

[DGEC 2021a], DGEC, Synthèse du scénario "avec mesures existantes" (AME 2021), Juin 2021

[DGT 2021a], Direction générale du Trésor, Analyse de la vulnérabilité des approvisionnements français, Décembre 2021

[EU 2020a], EU, Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, Avril 2020

[FED 2019a], FEDEREC, Chiffres 2019

[FREC 2018a], FREC, Plan ressources pour la France, 2018

[FSTR 2021a], FRANCE STRATEGIE, Biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel ? Note de synthèse, Juillet 2021

[FSTR 2021b], FRANCE STRATEGIE, Biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ? Document de travail 2021-03, Juillet 2021

[FSTR 2021c], FRANCE STRATEGIE, Biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ? Page de présentation, Juillet 2021

[FSTR 2021d], FRANCE STRATEGIE, Quelle rentabilité économique pour les rénovations énergétiques des logements ? La note d'analyse, Décembre 2021

[FSTR 2021e], FRANCE STRATEGIE, Quelle rentabilité économique pour les rénovations énergétiques des logements ? Cahier graphique et technique, Décembre 2021

[GNT 2014a], GNT Biogaz, ADEME, Green Gas Grids, une vision pour le biométhane en France pour 2030, Octobre 2014

[GRDF 2020a], GRDF, Perspectives Gaz 2020, Juin 2021

[GRDF 2020b], GRDF, Panorama gaz renouvelable 2020, Décembre 2020

[HQEGBC 2018a], Alliance HQE GBC, 15 leviers pour agir - Cadre de définition de l'économie circulaire dans le bâtiment, Janvier 2018

[IEA 2021a], IEA, The Role of Critical Materials in Clean Energy Transitions, Mai 2021

[IFP 2020a], IFP, Site web : les métaux dans la transition énergétique, 2020

[IFPEN IRIS 2019a], IFPEN IRIS, Vers une géopolitique de l'énergie plus complexe ? Une analyse prospective tridimensionnelle de la transition énergétique, Décembre 2018

[IFRI 2018a], IFRI, La transition énergétique face au défi des métaux critiques, Janvier 2018



[IFRI 2021a], IFRI, Géoéconomie des chaînes de valeur, Les matières premières minérales de la filière batterie, Août 2021

[INEC 2020a], INEC, La filière des pompes à chaleur au prisme de l'économie circulaire, Janvier 2020

[INEC 2021a], INEC, Pivoter vers l'industrie circulaire, Avril 2021

[INEC 2021b], INEC, Note Rapport Ademe Transition(s) 2050, L'économie circulaire catalyseur de la décarbonation, Décembre 2021

[INRA 2013a], INRA, Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques, Juillet 2013

[INRAE 2017a], INRAE, Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ?, Novembre 2017

[INRAE 2019a], INRAE, Le verdissement du gaz, Juillet 2019

[INTERMIN 2016a], Interministériel, Stratégie Nationale de Mobilisation de la Biomasse, Août 2016

[MAA 2021a], ministère de l'Agriculture et de l'alimentation, Programme national de la forêt et du bois 2016-2026, Janvier 2017

[MCK 2021a], MCKINSEY, How the metals and mining sector will be at the core of enabling the energy transition, Janvier 2021

[METABOLIC 2022a], Metabolic, Copper, Towards a circular energy transition : exploring solutions to mitigate surging demand for critical metals in the energy transition, Novembre 2021

[MTE 2020a], MTE, Stratégie Nationale Bas carbone - La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone, Mars 2020

[MTE 2020b], MTE, Stratégie Nationale Bas carbone - Rapport d'accompagnement, Mars 2020

[MTE 2020c], MTE, Le photovoltaïque - choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles, Décembre 2020

[MTE 2020d], MTE, Les réseaux électriques - choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles, Décembre 2020

[MTE 2020e], MTE, Les réseaux électriques - lignes électriques, stockage stationnaire et réseaux intelligents : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles, Décembre 2020

[MTE 2020f], MTE, Le photovoltaïque : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles, Décembre 2020

[NW 2021a], NegaWatt, Scénario négaWatt 2022, Octobre 2021

[OFATE 2021a], OFATE, Le rôle des métaux critiques dans la transition énergétique - défis et stratégies, Septembre 2021

[ONRB 2020a], ONRB, Évaluation des ressources agricoles et agroalimentaires disponibles en France – édition 2020, Février 2021

[OPECST 2016a], OPECST, Les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques, Mai 2016

[PFA 2018a], PFA, Matières premières, criticités et axes stratégiques des industriels de l'automobile, Juin 2018

[PFA 2020a], PFA, Position technique de filière - Hydrogène et piles à combustibles, Février 2020

[PGAZ 2021], GRDF GRTGAZ SPEGNN TERECA, Perspectives Gaz 2020, Juin 2021

[RECYBET 2019a], RECYBETON, Comment recycler le béton dans le béton, Mars 2019

[RTE 2019a], RTE, Mobilité électrique 2019, 2019

[RTE 2020a], RTE, Réduction des émissions de CO2, impact sur le système électrique, Décembre 2020

[RTE 2021a], RTE, Futurs énergétiques 2050, Octobre 2021

[SENAT 2021a], Sénat, Rapport d'information, La méthanisation dans le mix énergétique, enjeux et impacts, Septembre 2021

[SOLAGRO 2016a], SOLAGRO, Afterres 2050, Décembre 2016

[SOLAGRO 2019a], SOLAGRO, Vecteur Hydrogène bonne ou mauvaise solution, Université Négawatt, 2019

4.8 TABLE DES FIGURES

Figure 1	- De nombreux textes sur la décarbonation et l'économie circulaire... et un angle mort à l'intersection des deux sujets	17
Figure 2	- Les domaines et les ressources étudiés sont couverts par trois filières cohérentes : électrification et hydrogène, chaleur et biomasses, et construction.	21
Figure 3	- Les 6 dimensions du score de criticité (1 : criticité faible, 5 : criticité majeure)	22
Figure 4	- Critères d'évaluation pour l'établissement des scores de criticité	23
Figure 5	- Approche pour la quantification de la criticité : score, indice d'impact, MEC	24
Figure 6	- Les leviers ERRR de l'étude et leur correspondance avec les 7 piliers de l'ADEME	26
Figure 7	- Les leviers ERRR de la transformation circulaire seront mis en œuvre grâce à 5 leviers transverses	27
Figure 8	- Hypothèses de coûts des ressources (évaluation en coûts actuels moyens)	29
Figure 9	- Les grands principes et partis pris des scénarios A et B	31
Figure 10	- Principaux impacts des scénarios A (faiblement circulaire) et B (à circularité renforcée) – Focus métaux et minéraux	34
Figure 11	- Le Scénario B présente une meilleure utilisation des ressources biomasse solides et gazeuses disponibles	35
Figure 12	- Principaux impacts des scénarios A (faiblement circulaire) et B (à circularité renforcée) - Tous domaines et ressources	37
Figure 13	- Principaux impacts des scénarios A faiblement circulaire et B à circularité renforcée – Focus Béton	40
Figure 14	- Évaluation du niveau de criticité des ressources	42
Figure 15	- Évaluation du niveau de criticité des domaines	43
Figure 16	- Intensité en ressources - énergies finales (centimes d'euros.criticité par kWh)	44
Figure 17	- Intensité en ressources - énergies finales (g/kWh)	46
Figure 18	- Intensité en ressources - véhicules (centimes d'euros.criticité/km)	50
Figure 19	- Intensité en ressources - véhicules (g/km)	51
Figure 20	- Intensité en ressources - construction (euros.criticité/m ²)	52
Figure 21	- Intensité en ressources - construction (kg/m ²)	52
Figure 22	- Poids des domaines et ressources (en Mt, milliards d'euros, milliards d'euros.criticité)	53
Figure 23	- Millions d'euros.criticité des ressources et domaines de la SNBC en 2050 pour les deux scénarios A et B	54
Figure 24	- Concentration des pays acteurs dans l'extraction et la première transformation des ressources minérales (par ordre décroissant de part de marché du premier pays extracteur)	60
Figure 25	- Les besoins bruts en ressources pour la transition énergétique vont drastiquement augmenter dans le monde et en France d'ici 2040	62
Figure 26	- Maturité des leviers circulaires dans la filière Électrification et priorité des efforts à fournir	64
Figure 27	- Besoins totaux en ressources des domaines de l'électrification et de l'hydrogène (kt par an en 2050)	65
Figure 28	- Potentiel des leviers circulaires : illustration dans le domaine de l'éolien terrestre	67

Figure 29 - Bénéfices des leviers circulaires ERRR pour les ressources et les domaines de la SNBC dans les scénarios A et B (en MEC millions d'euros.criticité annuels 2050, avec et sans les véhicules électriques)	68
Figure 30 - Mobilisation des ressources primaires ultimes par les différents usages ; ressources disponibles pour l'énergie solide et gazeuse ; taux d'utilisation selon les scénarios A ou B	76
Figure 31 - Les ressources issues de la forêt, de l'agriculture et des déchets urbains et industriels sont utilisables de multiples façons pour produire des biomasses solides et gazeuses	77
Figure 32 - Ventilations des ressources biomasses primaires disponibles par destination d'usage final solide et gazeux - Taux d'utilisation dans les scénarios A et B	79
Figure 33 - Maturité des leviers circulaires dans la filière de la construction et priorité des efforts	83
Figure 34 - Chiffres clés des domaines de la construction neuve et de la rénovation (kt par an en 2050)	84
Figure 35 - Leviers circulaires à activer : illustration dans les domaines du bâtiment	87
Figure 36 - La convergence des technologies au service de l'économie circulaire de bout en bout	99
Figure 37 - Hypothèses de construction des scénarios A et B établis à partir des scénarios d'autres sources (ADEME Transitions S3, RTE Futurs énergétiques et DGEC AMS Gaz bas)	104
Figure 38 - Modélisation des flux bruts, des flux circulaires résultant des % ERRR et des flux nets	107
Figure 39 - Hypothèses % Réduire	109
Figure 40 - Hypothèses % Recycler - Collecte des fins de vie	113
Figure 41 - Hypothèses % de rendement du processus de recyclage	115
Figure 42 - Hypothèses % Recycler - Matière fonctionnelle réutilisée	116
Figure 43 - Hypothèses % Réemployer	119
Figure 44 - Evaluation des leviers circulaires pour les ressources (maturité actuelle et priorité des efforts)	122
Figure 45 - Ressources Bois-Forêt ultimes, mobilisables et disponibles (TWh d'énergie primaire)	124
Figure 46 - Ressources Agriculture ultimes, mobilisables et disponibles (TWh d'énergie primaire)	126
Figure 47 - Ressources Déchets urbains et Industriels ultimes, mobilisables et disponibles (TWh d'énergie primaire)	127
Figure 48 - Ventilation de l'énergie primaire disponible et taux d'utilisation en biomasses solides et gazeuses	129
Figure 49 - Apports, limites et pistes d'approfondissement de l'étude	133

4.9 SOMMAIRE DÉTAILLÉ

1	Une approche multisectorielle inédite qui associe décarbonation et contrainte de ressources	15
1.1	Un impératif : prendre en compte les ressources dans la construction de la SNBC	16
1.2	Les hypothèses : définition de la criticité et choix sémantiques	20
1.2.1	<i>La criticité : un score pour synthétiser une notion protéiforme</i>	22
1.2.2	<i>ERRR : un choix sémantique pour faciliter l'analyse quantitative</i>	25
1.2.3	<i>Les leviers transverses de la transformation circulaire</i>	27
1.2.4	<i>La quantification des flux bruts, nets et circulaires</i>	28
1.3	Deux scénarios à circularité faible ou renforcée pour matérialiser les enjeux	30
1.3.1	<i>Rappel des variantes proposées par les scénarios existants</i>	30
1.3.2	<i>Deux scénarios inspirés du scénario S3 de Transition(s) 2050</i>	30
2	Circularité et décarbonation : les grands enseignements	33
2.1	Souveraineté, sobriété, industrialisation du réemploi : trois enseignements clés pour une France bas carbone, circulaire et plus résiliente	33
2.1.1	<i>La circularité des ressources, un atout de souveraineté pour une France bas carbone et résiliente</i>	33
2.1.2	<i>La sobriété, un levier stratégique pour la résilience économique et la durabilité des écosystèmes naturels</i>	36
2.1.3	<i>La réindustrialisation nationale par le recyclage et le réemploi, source d'importants bénéfices économiques, sociaux et environnementaux</i>	38
2.2	Cahier des résultats quantitatifs	42
2.2.1	<i>Scores multifactoriels de criticité</i>	42
2.2.2	<i>Intensités par unités d'œuvre – Énergies finales (par kWh)</i>	44
2.2.3	<i>Intensités par unités d'œuvre – Véhicules (par km)</i>	50
2.2.4	<i>Intensités par unités d'œuvre – Construction (par m²)</i>	52
2.2.5	<i>Poids des domaines et ressources</i>	53
2.2.6	<i>Comparaison des scénarios A et B</i>	54
2.3	L'électrification : une filière au cœur de la décarbonation, mais qui dépend largement de ressources importées	58
2.3.1	<i>Une place centrale dans les stratégies de transition bas carbone</i>	58
2.3.2	<i>Lithium, cobalt, platinoïdes : des ressources critiques contrôlées par un petit nombre de pays extra-européens</i>	59
2.3.3	<i>Cuivre et aluminium : des ressources rendues critiques par l'effet volume considérable des véhicules électriques</i>	63
2.3.4	<i>L'importance déterminante des leviers de sobriété, de recyclage, de réemploi et d'écoconception pour l'électrification</i>	63
2.4	Les biomasses : leur valorisation est indispensable à la souveraineté énergétique, mais doit être organisée dans le respect des différents usages et de la biodiversité	73
2.4.1	<i>Les biomasses constituent actuellement la première forme d'énergie renouvelable et continueront à jouer un rôle de premier plan dans la SNBC</i>	73
2.4.2	<i>Outil de souveraineté, les biomasses doivent composer avec les contraintes de surfaces, d'usages et de pression sur la biodiversité</i>	74
2.4.3	<i>Quelques leviers pour valoriser les biomasses à grande échelle tout en prêtant attention aux contraintes environnementales</i>	80
2.5	La construction : les volumes pèsent sur la filière, mais peuvent être drastiquement réduits avec une approche circulaire	81

2.5.1	<i>La filière contribue à améliorer l'efficacité énergétique du parc bâti et à construire les infrastructures d'énergie décarbonée</i>	81
2.5.2	<i>La criticité tient à la pression exercée par l'ampleur des volumes autour des centres urbains</i>	81
2.5.3	<i>Des choix stratégiques en faveur de la rénovation et du recyclage permettraient de diviser par trois les tonnages nets</i>	82
3	Les leviers transverses de la mise en place de la circularité	89
3.1	Articuler les réglementations en faveur de l'économie circulaire et de la décarbonation	89
3.2	Flécher les financements vers les projets vertueux du point de vue des ressources	91
3.2.1	<i>Impact investing : favoriser l'investissement dans les projets à circularité forte</i>	91
3.2.2	<i>Mobiliser les outils financiers de la puissance publique pour soutenir des filières identifiées</i>	91
3.3	Faire que l'écoconception des produits et services devienne la norme	93
3.3.1	<i>L'écoconception, une approche transformatrice à tous les niveaux</i>	93
3.3.2	<i>Les métiers de l'entreprise agissent ensemble, mais sur des leviers parfois différents</i>	93
3.4	Créer les conditions de l'indépendance en ressources en réorganisant l'économie sur le territoire	95
3.4.1	<i>Systématiser l'écologie industrielle et territoriale</i>	95
3.4.2	<i>Mailler le territoire d'infrastructures de récupération, tri, stockage et valorisation</i>	95
3.4.3	<i>Développer une économie du PIB local</i>	96
3.5	S'appuyer sur la digitalisation pour mettre en œuvre les stratégies d'économie circulaire	97
3.5.1	<i>Grâce à la traçabilité, le digital restitue leur valeur aux ressources anonymes et distingue les produits à haut contenu circulaire</i>	97
3.5.2	<i>Les plateformes de filières et territoriales faciliteront la mise en relation des acteurs et des flux physiques</i>	98
3.5.3	<i>La convergence des technologies numériques permettra une économie circulaire à la fois industrialisée et individualisée</i>	98
3.6	Soutenir la R&D et l'innovation est nécessaire pour mieux préserver les ressources	101
4	Annexe I - Méthodologie	103
4.1	Hypothèses des Scénarios A et B	103
4.2	Flux bruts, flux circulaires et flux nets	106
4.3	Hypothèses ERRR : tableau des %	108
4.3.1	<i>% Éviter</i>	108
4.3.2	<i>% Réduire</i>	108
4.3.3	<i>% Recycler</i>	112
4.3.4	<i>% Réemployer</i>	118
4.4	Scores d'évaluation des leviers circulaires par ressource	122
4.5	Hypothèses sur les énergies primaires disponibles pour l'usage en biomasses solides et gazeuses	123
4.6	Apports, limites et pistes d'approfondissement de l'étude	132
4.7	Bibliographie	137
4.8	Table des figures	140
4.9	Sommaire	142
5	Annexe II - Fiches Domaines et Ressources	
6	Annexe III – Résultats quantitatifs détaillés	

À propos de l'INEC

Fondé en 2013, l'Institut National de l'Économie Circulaire est l'organisme de référence et d'influence autour de l'économie de la ressource. Sa mission est de fédérer l'ensemble des acteurs publics et privés pour promouvoir l'économie circulaire et accélérer son développement. Organisme multi-acteurs, il est composé de plus de 150 membres : entreprises, fédérations, collectivités, associations, et universités.

Plus d'informations sur

<https://institut-economie-circulaire.fr/>

Emmanuelle LEDOUX

e.ledoux@institut-economie-circulaire.fr

À propos de Capgemini Invent

Capgemini Invent est la marque d'innovation digitale, de design et de transformation du groupe Capgemini, qui permet aux dirigeants de façonner l'avenir de leurs entreprises. Etablie dans plus de 36 bureaux et 37 studios de création dans le monde, elle comprend une équipe de plus de 10 000 collaborateurs composée d'experts en stratégie, de data scientists, de concepteurs de produits et d'expériences, d'experts en marques et en technologie qui développent de nouveaux services digitaux, produits, expériences et modèles d'affaire pour une croissance durable.

Capgemini Invent fait partie du groupe Capgemini, un leader mondial, responsable et multiculturel, regroupant 340 000 personnes dans plus de 50 pays. Partenaire stratégique des entreprises pour la transformation de leurs activités en tirant profit de toute la puissance de la technologie, le Groupe est guidé au quotidien par sa raison d'être : libérer les énergies humaines par la technologie pour un avenir inclusif et durable. Fort de 55 ans d'expérience et d'une grande expertise des différents secteurs d'activité, Capgemini est reconnu par ses clients pour répondre à l'ensemble de leurs besoins, de la stratégie et du design jusqu'au management des opérations, en tirant parti des innovations dans les domaines en perpétuelle évolution du cloud, de la data, de l'Intelligence Artificielle, de la connectivité, des logiciels, de l'ingénierie digitale et des plateformes. Le Groupe a réalisé un chiffre d'affaires de 18 milliards d'euros en 2021. billion.

Plus d'informations sur

www.capgemini.com/invent

*Capgemini, le futur que vous voulez

Alain CHARDON

alain.chardon@capgemini.com

**GET THE FUTURE
YOU WANT**

Copyright © 2022 Capgemini. Tous droits réservés.

