

Impacts sur les matériaux d'une transition énergétique fondée sur la sobriété, l'efficacité et les énergies renouvelables

Emmanuel Rauzier
Association négaWatt
BP 16280 Alixan, F-26958 Valence Cedex 9
e.rauzier@institut-negawatt.com

Edouard Toulouse
Association négaWatt
BP 16280 Alixan, F-26958 Valence Cedex 9
edouard.toulouse@negawatt.org

Résumé

Depuis deux décennies, l'Association négaWatt publie et met à jour un scénario complet de transition énergétique pour la France, qui montre comment le pays pourrait s'orienter vers un mix énergétique 100 % renouvelable, avec la contribution de l'efficacité et de la sobriété énergétiques pour maîtriser la demande.

Des questions récurrentes apparaissent régulièrement sur les impacts matériaux d'un tel scénario, par exemple sur les risques d'épuisement potentiel et sur la manière dont les principes de sobriété et d'économie circulaire pourraient être appliqués aux ressources matérielles. Pour répondre à ces interrogations, les experts du scénario ont entrepris un travail considérable de modélisation et développé un outil de calcul appelé "négaMat".

Ce document décrit les objectifs et l'approche de négaMat. Il précise en détail les étapes méthodologiques et les illustre par des résultats obtenus dans le cadre du scénario français négaWatt.

Il montre par exemple que les bâtiments et travaux publics représentent le plus gros tonnage d'utilisation de matériaux, et que modérer le besoin de nouveaux bâtiments aurait un impact substantiel. La sobriété est également un levier pour réduire la consommation d'autres biens (papier, électronique, véhicules...).

Le module de calcul montre comment ces baisses de consommation peuvent être contrebalancées par une relocalisation intelligente de certains secteurs manufacturiers dans le pays, ce qui conduit à une stabilisation relative de l'activité industrielle totale.

NégaMat peut également fournir des indications sur les ressources matérielles mises en œuvre pour la transition énergétique. Par exemple, si le fer n'est pas

vraiment un problème, le cuivre mérite une attention particulière dans le cadre du développement d'un réseau 100 % renouvelable. La mobilité électrique est également une source d'inquiétude, car une électrification de tous les véhicules actuels entraînerait de graves tensions sur le lithium. Seul un scénario du type de négaWatt avec des efforts de sobriété (moins de distance parcourue, un report modal important, une augmentation du covoiturage et un mix de motorisations durables) pourrait atténuer les risques sur la ressource.

Introduction

Depuis 2001, l'Association négaWatt a développé un scénario systémique de transition énergétique pour la France qui permet d'atteindre un approvisionnement en énergie 100 % renouvelable en 2050¹. Ce scénario est basé sur la sobriété, l'efficacité et les énergies renouvelables. La sobriété consiste à réduire nos besoins en services et biens consommateurs d'énergie, tandis que l'efficacité - plus connue - consiste à réduire l'énergie utilisée pour fournir un certain service. Lors de la conception du modèle soutenant le scénario, les questions suivantes ont émergées en ce qui concerne le secteur industriel :

- Est-il possible de prévoir la consommation de biens et de matériaux en fonction d'une demande quantitative prévue et non d'une valeur marchande supposée ?
- Comment l'évolution de la consommation de biens est-elle liée aux flux de matières dont ils sont constitués ?
- Quels sont les liens entre la production et la consommation locales, y compris les produits importés ?

¹ Association négaWatt <https://negawatt.org/en>

- Comment calculer précisément l'impact sur la consommation de biens et de matières d'une transition énergétique (fondée sur la sobriété, l'économie circulaire et les nouvelles technologies) ?

Pour répondre à ce type de questions, dans la dernière mise à jour du scénario négaWatt (négaWatt 2021), l'outil de calcul industriel a été considérablement renforcé et divisé en deux parties. Le premier outil prospectif nommé "négaMat" évalue les quantités de biens et de matériaux nécessaires et consommés dans le scénario. Le second outil évalue les améliorations de l'intensité énergétique industrielle et l'émergence éventuelle de nouvelles technologies. Ces deux outils peuvent fonctionner ensemble pour fournir la consommation énergétique industrielle et les émissions de GES résultant de la mise en œuvre du scénario. La première valeur ajoutée de cette approche est de distinguer clairement la contribution de l'économie circulaire et de la sobriété d'une part, et celle de l'efficacité technique et industrielle d'autre part. Deuxième valeur ajoutée : l'outil négaMat peut évaluer l'empreinte matériaux du scénario et son influence sur les besoins d'extraction de matières premières.

Cet article donne une vue d'ensemble de l'outil négaMat, en commençant par une description méthodologique, puis en fournissant des aperçus, des exemples et quelques résultats dans le cadre du scénario français négaWatt.

Description du modèle

La plupart des modèles prospectifs couvrant les matériaux et les biens reposent sur des évaluations économiques de l'augmentation de la valeur des biens et des prévisions de tendances sur les matériaux qui sont plus ou moins corrélées. Par exemple le SDS de l'AIE² modélise l'énergie consommée par l'industrie sur la base de l'évolution du PIB et de l'évolution de la valeur ajoutée pour un secteur donné (AIE 2021a).

Il existe un nombre croissant d'exercices de modélisation qui étudient spécifiquement les besoins futurs en matériaux, notamment dans le contexte d'une transition énergétique (AIE 2021b, Takuma et al 2019). D'autres étudient des secteurs spécifiques, comme la construction et les transports (Pauliuk et al 2021). La plupart de ces modélisations reposent sur des statistiques mondiales, mais certaines sont spécifiques à un pays, par exemple la France (Baylot et al 2019).

L'outil négaMat a été développé en interne par les experts de l'Association négaWatt, sur la base d'un premier programme de coopération avec l'Agence de la transition écologique (ADEME 2020). Il a des objectifs similaires aux modèles mentionnés ci-dessus, mais aussi des spécificités :

- Le modèle étudie un éventail particulièrement large de secteurs, énumérés dans la figure 2. Il peut donc être utilisé pour une évaluation complète des matériaux consommés dans un scénario systémique. Il est également possible de faire une distinction entre les secteurs, par exemple la nouvelle mobilité, le système d'approvisionnement en énergie, etc.
- Sa version actuelle comprend une cartographie de l'année de référence, des hypothèses prospectives sur une base annuelle, et un module de calcul et de sortie des résultats. Les données d'entrée de la cartographie comprennent les flux massiques de production, d'importation, d'exportation et de consommation pour les matériaux, ainsi que les principaux biens de consommation et industriels. Le module de calcul peut tenir compte d'hypothèses sur la sobriété, l'économie circulaire, les taux de recyclage et l'évolution des taux I/E³.
- Les hypothèses prospectives et le module de calcul sont clairement séparés, de sorte que l'outil peut potentiellement être exécuté et donner des résultats pour des scénarios différents. Jusqu'à présent, il a été utilisé pour la version 2021 du scénario négaWatt (négaWatt 2021), ainsi que pour une série de scénarios de neutralité climatique préparés par l'ADEME (ADEME 2021). L'outil est conçu pour fonctionner avec différents types de scénarios, de pays ou de régions, comme l'Europe par exemple à condition de disposer de données statistiques.

Fondamentalement, l'outil prend en compte les chaînes reliant la consommation de biens finaux aux besoins en matières premières en amont. Il a été conçu pour évaluer les flux physiques (tonnes/an) de production et de consommation de matières, mais aussi de biens (quelle que soit leur valeur marchande). Les étapes de cette chaîne pour différents produits sont décrites sur la figure 1.

Dans le modèle, les marchandises et les matériaux sont mis en corrélation par un bilan matière selon le schéma de la figure 1. Dans la pratique, ceci est modélisé par des matrices imbriquées entre matières premières / matières de base / matières transformées / biens de consommation et d'équipement. Pour exemple, le tonnage de voitures produites à année donnée est lié aux tonnages des matériaux constitutifs (acier, verre, plastiques, etc.). Et les plastiques eux-mêmes sont liés aux tonnages d'oléfines ou autres produits chimiques, eux-mêmes liés au pétrole dont ils sont dérivés.

L'approche de négaMat suit une logique similaire à l'approche globale de l'Association négaWatt, à savoir examiner les besoins énergétiques et matériels dans une perspective ascendante : au lieu de déduire ces

² Scénario de développement durable

³ Importation / exportation

besoins d'indicateurs macroéconomiques tels que le PIB, elle va dans l'autre sens en s'interrogeant d'abord sur nos besoins en énergie et en services matériels et sur la manière dont ils pourraient être systématiquement réduits et optimisés grâce à la sobriété et à une configuration sociétale différente. Cela nécessite une étude approfondie et détaillée de tous les secteurs et services.

Les flux physiques de matières sont analysés en amont "du berceau à la tombe", c'est-à-dire de l'extraction des ressources au produit final disponible dans les magasins, puis aux déchets et à leur traitement. Ces flux sont retracés en amont, depuis les produits finis jusqu'à l'extraction des ressources, puis jusqu'aux déchets et à leur traitement. Cela se reflète dans le sens des flèches de la figure 1.

Ces étapes consécutives vont maintenant être précisées et illustrées par des exemples concrets tirés de la mise en œuvre de négaMat.

Étape 1 : Consommation de biens

Les biens de consommation sont les produits finis proposés à la vente pour satisfaire les besoins des citoyens ou de la collectivité. Les biens d'équipement sont des produits nécessaires à la fabrication, tels que les machines-outils, les équipements de construction, auxquels il faut ajouter les engrais et les emballages. Ces biens (que nous appelons "BECs"⁴) peuvent être divisés en 9 catégories, que nous avons subdivisées en 128 sous-groupes comme le montre la figure 2. Par exemple, l'électronique comprend les ordinateurs, les dispositifs de communication, l'électronique grand public et les équipements professionnels. Cependant, les composants actifs et passifs et les cartes, ainsi que les batteries, ne sont pas inclus dans cette liste. Nous les considérons comme des produits intermédiaires utilisés dans la fabrication de divers articles (voitures, réseaux, etc.).

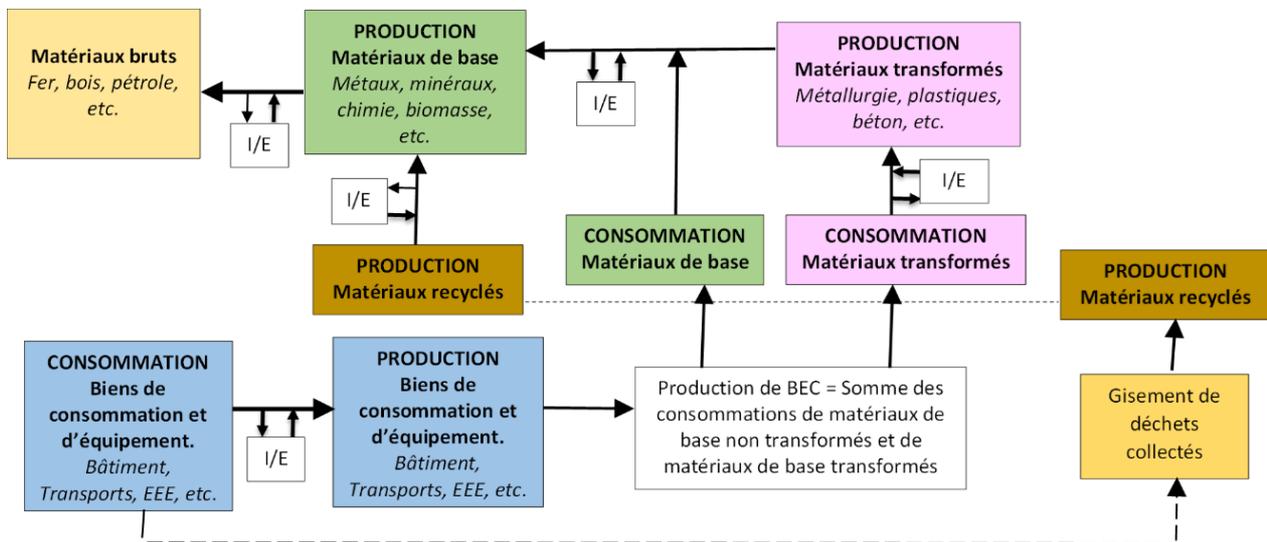


Figure 1 : Synoptique des relations entre la consommation et la production de biens et de matières ; I/E signifie Importations / Exportations. La ligne en pointillé signifie que le gisement de déchets n'est pas lié à la consommation actuelle mais à la consommation passée (voir étape 4).

Tableau 1 : Les différents groupes et le nombre de sous-groupes de biens de consommation et d'équipement, et les leviers de la sobriété et de l'économie circulaire.

	Sobriété taille	Sobriété usage	Sobriété mutual.	Réutilisation	Réparation	Recyclage	Nbre secteurs
AGRO ALIMENT.	OUI	OUI	NON	NON	NON	NON	8
PAPIER	OUI	OUI	NON	NON	NON	OUI	3
Mécanique EEE	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	15
Textile Divers	OUI	NON	Peu	OUI	OUI	OUI	14
EMBALLAGES	OUI	OUI	NON	OUI	Peu	OUI	11
TRANSPORTS	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	15
CHIMIE FINE	OUI	OUI	NON	NON	NON	NON	11
BATIMENT - TP	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	19
ENERGIE RESEAUX	NON	NON	NON	NON	OUI	OUI	32
TOTAL							128

⁴ Biens de consommation et d'équipement

L'évolution de la consommation de BECs dépend de trois critères principaux :

- La sobriété, l'un des trois piliers de l'approche négaWatt (négaWatt 2018), qui consiste à créer les conditions pour modérer nos besoins en services énergivores et matériels. Il peut s'agir de la sobriété dimensionnelle (par exemple, optimiser la taille d'un réfrigérateur à nos besoins réels), de la sobriété d'usage (par exemple, réduire la fréquence d'utilisation des appareils) ou de la sobriété collaborative (par exemple, augmenter le covoiturage).
- La réutilisation des produits qui existent pour le marché de l'occasion (par exemple, les véhicules). Elle peut être augmentée pour les emballages par exemple, grâce à des systèmes de consignation.
- La durée de vie des biens, qui concerne la réparabilité, la disponibilité des pièces de rechange et les services après-vente appropriés.

La pertinence de ces critères en fonction de chaque groupe de BEC est résumée dans le tableau 1 dans lequel nous avons ajouté le recyclage, un autre pilier important de l'économie circulaire (que nous aborderons plus tard).

A titre d'exemple, la figure 2 ci-dessous montre les résultats de l'application de négaMat au scénario français négaWatt et présente la consommation de biens en Mt en 2014 et à l'horizon 2050. Le bâtiment et les travaux publics représentent le tonnage le plus important, avec une diminution de 36 % entre 2014 et 2050. En raison de la démographie et d'une stabilisation du nombre de personnes par ménage dans le futur, il devient moins nécessaire de construire autant de logements neufs qu'aujourd'hui. Le réseau routier déjà très dense ne nécessite plus de nouvelles routes mais un entretien (moins gourmand en matériaux). Avec près de 100 Mt, l'alimentation arrive en deuxième position et bien que les régimes alimentaires moyens changent sensiblement dans le scénario Afterres qui a inspiré négaWatt (Solagro 2016), les quantités globales restent similaires.

Nous pouvons comparer ces résultats à d'autres études. L'évolution des bâtiments et des transports a été analysée par Paliuk et al (Paliuk et al 2021), qui ont examiné un scénario prévoyant une réduction de la surface au sol par personne, l'allongement de la durée de vie des produits, la réutilisation, le covoiturage et une plus grande récupération des déchets. Malgré un champ d'application très différent (mondial pour Paliuk et al et spécifique à chaque pays pour négaMat), une diminution importante et similaire est observée entre 2015 et 2050 pour le ciment (-63 % pour les deux scénarios) et l'acier (-62 % pour Paliuk et al, et -48 % pour négaWatt). Dans Paliuk et al, le bois diminue de -

11 %, et seulement de -3 % dans négaWatt.

Cependant, les résultats pour l'aluminium et le cuivre sont largement divergents car les hypothèses de mobilité sont très différentes dans les deux études, notamment en ce qui concerne la taille moyenne des voitures et les distances parcourues (la différence de portée géographique joue probablement un rôle clé ici).

Dans les hypothèses du scénario négaWatt, les autres flux de biens et de matières sont massivement réduits, à l'exception de la fourniture d'énergie et des réseaux, conformément à l'objectif de 100 % de renouvelables. Le papier diminue de 38 % d'ici 2050 (remplacé par des outils numériques). La mécanique et les EEE⁵ diminuent de 22 % malgré une utilisation accrue des services numériques, compensée par des appareils plus durables (qui intègrent plus de fonctions, sont plus petits et finalement plus réparables). La masse des véhicules utilisés pour le transport diminue de 44 %, principalement en raison de la réduction de la mobilité routière (-28 %) au profit des transports publics, et de véhicules plus petits (-30 %) et plus durables (+28 %). Le taux d'occupation joue un rôle important, puisqu'il est censé passer de 1,69 à 2,03 d'ici 2050. À l'exception des engrais azotés, qui diminuent de 40 %, les autres produits présentent des variations moins importantes.

La transition énergétique telle que proposée par négaWatt nécessite plus de matériaux dans certains secteurs (en raison des changements de vecteurs et de sources d'énergie, du stockage, des améliorations technologiques, etc.), mais cela est globalement compensé par des diminutions dans d'autres secteurs grâce aux efforts de sobriété et de durabilité.

Étape 2 : De la consommation à la production

La production de biens (P) au cours d'une année donnée est liée à la consommation (C), aux flux d'échanges internationaux (exportations E et importations I) et aux stocks (S) par la formule suivante : $C = P + I - E - S$. Les données statistiques sont généralement disponibles pour la plupart des biens en France à l'année de départ de notre simulation. En ce qui concerne les hypothèses futures, un éventail d'hypothèses est nécessaire concernant le ratio P/C, indicateur du commerce international. L'outil permet de fixer de telles hypothèses pour 58 secteurs de biens finaux, auxquels nous avons ajouté 137 secteurs de matériaux de base, intermédiaires et recyclés. Pour chaque secteur, un rapport P/C inférieur à 1 indique une importation nette dans le pays, et dans le cas contraire, une exportation nette.

⁵ Équipements électriques et électroniques

Dans un modèle de flux physiques tel que négaMat, il est nécessaire d'anticiper l'évolution du commerce international. La plus ou moins grande délocalisation de la production de biens influence la consommation des matériaux entrants et toute l'industrie en aval (qui est généralement énergivore et une source importante d'émissions de carbone). Comment anticiper les tendances en matière de relocalisation ? La réponse est largement politique, car elle est liée aux mesures financières et des incitations en faveur de l'emploi qui pourraient être mises en place. Ces mesures sont particulièrement débattues dans de nombreux pays dans le cadre des plans de relance post-COVID.

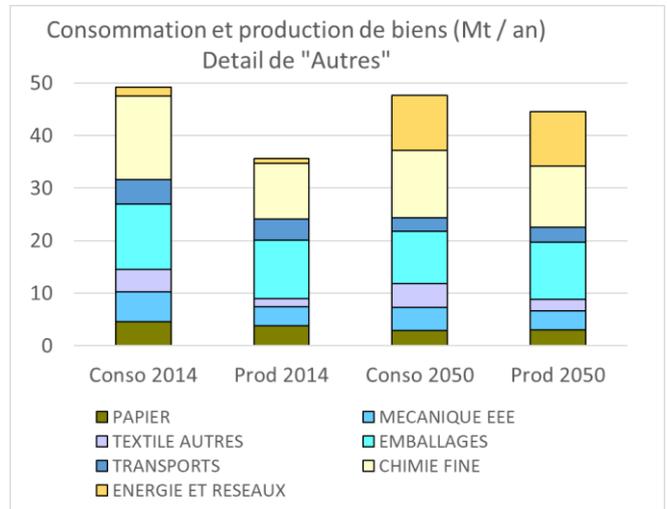
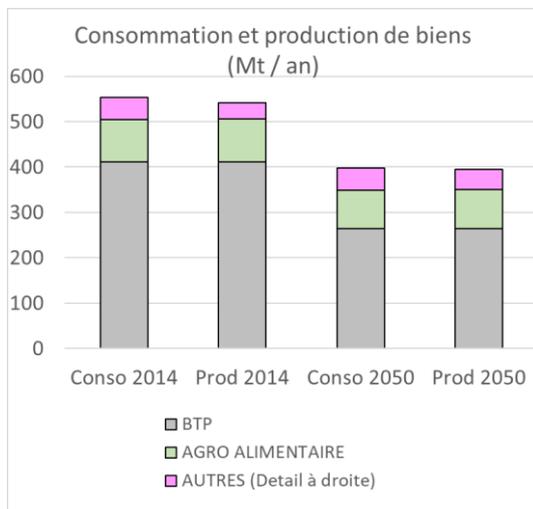
Par exemple, en France un récent rapport du Haut-Commissariat au Plan (HCP 2021) souligne que depuis plusieurs années, l'industrie française décline au profit des importations (ce qui dégrade la balance commerciale du pays). Différentes hypothèses sont possibles ; le scénario négaWatt suppose un certain nombre de relocalisations ciblées à l'avenir.

La figure 2 montre l'évolution de la production et de la consommation entre 2014 et 2050 lorsqu'on applique négaMat au scénario négaWatt et aux principaux regroupements de BECs. Le secteur du bâtiment et des travaux publics ne pouvant être déplacé, son rapport

P/C reste à 1. Pour le secteur de l'alimentation et des boissons, le P/C est proche de 1 et cela ne devrait pas beaucoup changer d'ici 2050.

Actuellement, le rapport P/C est particulièrement faible pour le système énergétique (0,49), les éoliennes et les panneaux photovoltaïques étant majoritairement importés de l'étranger. Les secteurs de la construction mécanique et des EEE⁶ (P/C de 0,62) et du textile (P/C de 0,37) présentent également un solde largement déficitaire. À l'horizon 2050, il est intéressant de noter que la situation pourrait être sensiblement rééquilibrée par une relocalisation progressive des systèmes d'énergies renouvelables. En outre, la sobriété et l'économie circulaire pourraient réduire les besoins de consommation globale de 22 %, mais cette réduction serait compensée par la relocalisation de certains secteurs. Au final, les hypothèses *bottom up* du scénario négaWatt se traduisent par une stabilisation relative du niveau de la production industrielle en France à l'horizon 2050. Il révèle qu'une baisse de la consommation d'énergie et de matières par la sobriété et l'efficacité ne signifie pas nécessairement une récession économique ou industrielle.

Figure 2 : Évolution de la consommation et de la production de biens dans le scénario négaWatt (outil négaMat)



⁶ Équipements électriques et électroniques

Étape 3 : Chaînes de matériaux

Comme le montre la figure 1, la production de biens est liée à la consommation de matières, qu'elles soient de base ou transformées (ou intermédiaires). Les matériaux de base peuvent être regroupés en cinq classes :

- les matériaux de la biomasse : bois et produits végétaux pour l'industrie alimentaire,
- métaux : acier, aluminium, cuivre, Pb, Zn, Ni, Sn, Cr, Mn, cobalt et métaux précieux,
- la silice et le lithium,
- produits minéraux : terre, sable, agrégats, clinker, plâtre, chaux,
- les bases chimiques : ammoniac, chlore, soude, oléfines, aromatiques, et autres.

Certains matériaux de base sont directement issus de matières premières car ils sont utilisés en tant que tels pour des produits intermédiaires (par exemple, le bois, le sable pour le béton, etc.). Des matériaux de base aux BECs, les chaînes sont plus ou moins complexes :

- Exemples de chaînes de second ordre : acier direct → chemin de fer ; agrégats → construction,
- Exemples de chaînes de troisième ordre : clinker → ciment → béton → construction,
- Exemple de chaîne d'ordre quatre : éthylène + benzène → styrène → polystyrène → emballage,
- Exemples d'une chaîne d'ordre cinq : cuivre affiné → alliage de cuivre → composant électronique → carte électronique → ordinateur.

Le matériau n'entre pas toujours dans la composition d'un bien. Outre les pertes, il est parfois simplement utilisé comme catalyseur d'un processus industriel. Par exemple, la soude est nécessaire pour produire du papier Kraft, l'oxygène pour l'industrie sidérurgique, etc.

La composition d'un BEC peut changer au fil du temps en raison de son allègement ou de la substitution de matériaux. Dans l'outil négaMat, ce potentiel n'a pas pu être pris en compte pour tous les biens en raison de limites méthodologiques (par exemple, les meubles ou les peintures), mais il est modélisé pour les secteurs les plus énergivores. Par exemple, chaque type d'emballage est traité séparément, ce qui permet la substitution de l'un à l'autre. Les engrais azotés, phosphatés, potassiques ou naturels sont traités séparément, ce qui permet également une substitution. En ce qui concerne le secteur du bâtiment, des hypothèses spécifiques sont faites concernant les parts de marché du bois ou du béton dans les structures, du bois, de l'aluminium ou du PVC dans les menuiseries, des isolants en polystyrène, en laine de verre ou biosourcés, etc. Pour les transports, la masse et la composition de chaque type de véhicules (thermiques,

électriques ou hybrides) sont fonction de l'année de modélisation.

Étape 4 : Déchets et matières premières recyclées

Lors de l'évaluation des matériaux, il est nécessaire de tenir compte de leur origine : primaire ou recyclée.

L'outil négaMat dispose d'un module élaboré sur les déchets et le recyclage qui fonctionne comme suit :

1. Tout d'abord, le flux de déchets est évalué pour chaque BEC. On attribue à chacun, une durée de vie ("DV"), par exemple moins d'un an pour les denrées alimentaires ou les emballages, et environ 15 ans pour les voitures. La masse de BEC en fin de vie pour une année x donnée correspond à la consommation de ce bien au cours de l'année $x-DV$. Pour cela, nous retraçons l'historique des consommations depuis 2000. Seul le secteur du bâtiment échappe à cette règle car il est illusoire d'évaluer la durée de vie moyenne d'un bâtiment : un calcul spécifique prend en compte les tendances de destruction du passé pour anticiper celles du futur.
2. Les déchets sont ensuite dirigés vers la valorisation agricole, l'incinération ou le recyclage avec des taux directionnels appropriés. Le reste est considéré comme étant mis en décharge ou perdu. Le taux de recyclage à cette étape est appelé taux de collecte et correspond au départ vers un centre de tri.
3. Dans le centre de tri et pour chaque bien, les matériaux ne sont pas traités de la même manière : l'acier est généralement très bien valorisé, tandis que les plastiques le sont beaucoup moins. Pour cinq grands groupes (construction, transport, emballages, batteries et autres), nous avons fixé un taux de récupération pour chaque matériau. Les matériaux qui ne sont pas récupérés sont finalement considérés comme perdus ou enfouis.
4. La matière première recyclée (MPR) est alors soumise au marché international de l'import/export, et finit en production avec un taux d'incorporation défini comme le ratio MPR / matière totale produite, également appelé EOL-RIR⁷ (JRC 2018).

Le taux d'incorporation ainsi calculé à partir du gisement de déchets n'est pas automatiquement celui qui sera utilisé dans la modélisation. Des contraintes techniques doivent également être prises en compte. Par exemple, en raison de la dégradation des fibres, le taux maximal de papier recyclé ne peut pas dépasser 80 %. Pour l'acier recyclé, le taux pourrait ne pas être aussi élevé que prévu pour deux raisons : la disponibilité de l'outil industriel (EAF⁸) et la qualité de l'acier qui ne permet pas certaines utilisations (par

⁷ Taux d'entrée en fin de vie

⁸ Four à arc électrique

exemple, pour les tôles). Deux cas peuvent alors se présenter :

- Le taux d'incorporation calculé par le gisement de déchets (qui peut même être supérieur à 100 %) est suffisant mais supérieur au taux technique. C'est cette dernière valeur qui est alors utilisée.
- Le taux d'incorporation calculé par le gisement de déchets est inférieur au taux technique, et c'est alors ce taux lié aux déchets qui est utilisé.

Ceci est particulièrement vrai dans un domaine en croissance comme les batteries au lithium. Même si des progrès considérables sont attendus sur la recyclabilité du lithium, avec un taux de croissance moyen de 6 %⁹ et une durée de vie des batteries de 7 ans, le gisement de lithium issu des batteries en fin de vie ne peut excéder 67 % des besoins de la production future.

Tableau 2 : Exemple des plastiques contenus dans les biens en fin de vie, leur taux de collecte vers les centres de tri, leur taux de valorisation, et leur taux d'incorporation dans la fabrication dans le scénario négaWatt.

Mt 2019	Déchet	Taux collecte	Collecté	Plastique	Taux récup	MPR			
TOTAL						0,712	→	TOTAL	0,712
Mécanique EEE	5,215	72%	3,773	0,584	18%	0,104		Export	0,339
Divers autres	3,849	18%	0,682	0,225	14%	0,032		Prod MPR	0,373
Emballages	2,060	35%	0,711	0,695	52%	0,363		Prod TOTALE	5,476
Transports	4,954	95%	4,706	0,450	12%	0,055		Incorpo MPR	7%
Bâtiment	222,327	46%	102,24	1,150	14%	0,158			

Mt 2050	Déchet	Taux collecte	Collecté	Plastique	Taux récup	MPR			
TOTAL						2,606	→	TOTAL	2,606
Mécanique EEE	4,792	87%	4,167	0,650	57%	0,372		Export	0,244
Divers autres	4,485	80%	3,588	1,353	55%	0,741		Prod MPR	2,362
Emballages	1,515	80%	1,212	1,186	85%	1,010		Prod TOTALE	5,050
Transports	2,746	100%	2,746	0,265	67%	0,176		Incorpo MPR	47%
Bâtiment	109,950	57%	62,78	0,503	61%	0,306			

Le tableau 2 illustre ces différentes étapes de la collecte des déchets à l'incorporation des MPR avec l'exemple des plastiques en France en 2014 et leur évolution en 2050 dans le cadre du scénario négaWatt. On remarque qu'en 2014, pour les appareils mécaniques et électriques ainsi que pour les matériels de transport, la collecte pour le recyclage pour l'ensemble du secteur est plutôt bonne. Cette collecte est plus faible pour la construction (46 %) et les articles divers (18 %). La quantité totale de ce qui est collecté et de ce qui va être trié correspond à environ 110 Mt, et le flux potentiel de déchets plastiques à valoriser n'en représentent qu'une petite fraction, à savoir 3,104 Mt.

Mais les taux de valorisation des plastiques dans les installations de tri sont actuellement faibles (entre 12 et 18 %), sauf pour les emballages (52 %). La production de MPR est alors de 0,712 Mt, quatre fois moins que le gisement potentiel de déchets plastiques. À l'étape suivante, environ la moitié de ces MPR sont exportées

et seulement 0,373 Mt sont utilisées dans la fabrication, ce qui conduit à un taux d'incorporation moyen de seulement 7 %.

Cette piètre performance s'améliore d'ici à 2050, grâce à des politiques et des efforts spécifiques. Le flux de déchets plastiques devrait atteindre près de 4 Mt pour aboutir à un taux d'incorporation de 47 %, soit six fois plus qu'en 2014.

Étape 5 : Ressources en matières premières

Au stade final de l'approche négaMat se trouvent les matières premières, qui sont regroupées en quatre catégories principales selon la classification EUROSTAT MFA¹⁰ (EUROSTAT 2018) : biomasse, métaux, minéraux non métalliques et combustibles fossiles. Chaque catégorie est divisée en sous-classes.

⁹ C'est le taux de croissance moyen de la consommation de lithium entre 2022 et 2037 dans le scénario négaWatt.

¹⁰ Comptes de flux de matières

Quelle est l'empreinte réelle de nos activités sur l'extraction de ces ressources ? La méthode EUROSTAT RME¹¹ (EUROSTAT 2017) identifie la Consommation Domestique (DC) nécessaire à la production des matières premières, et la Consommation de Matières Premières (RMC) qui est l'empreinte matérielle prenant en compte les importations et les exportations de biens et leur contenu en matières premières. Bien que le calcul de la quantité de ressources incorporées dans les importations/exportations soit différent, notre approche conduit à des résultats similaires pour l'année de référence.

Le besoin en matières premières est corrélé avec le taux d'incorporation de matériaux recyclés. Plus le taux d'incorporation est élevé, moins il faut de matière vierge. Afin d'évaluer l'empreinte matérielle, il faut considérer le taux d'incorporation à l'intérieur de la région analysée, mais aussi pour les produits fabriqués à l'étranger et importés. En l'absence d'une description statistique détaillée du très grand nombre d'échanges internationaux, un taux d'incorporation moyen simplifié à l'étranger a été considéré, en séparant la zone Euro et le reste du monde. Il est ensuite nécessaire de poser des hypothèses sur l'évolution de ces taux d'incorporation dans le futur. Par exemple, le scénario négaWatt suppose que les taux nationaux et étrangers convergent progressivement d'ici 2050.

Étape 6 : Durabilité des besoins en matières premières

Au terme de l'analyse, afin d'évaluer si un besoin spécifique en matière première reste durable ou pourrait représenter une pression excessive sur la ressource, il est nécessaire de comparer le niveau des besoins aux réserves disponibles. Cela soulève deux questions méthodologiques importantes :

- Quelle est la quantité disponible ? L'Institut canadien des mines¹² fait la distinction entre les ressources identifiées, estimées et les réserves. La réserve est la partie de la ressource qui a fait l'objet d'un forage préliminaire pour déterminer la taille du gisement et la quantité qui peut être extraite dans des conditions économiques viables. Par exemple, l'US Geological Survey, qui compile de nombreuses statistiques, fait état d'une réserve mondiale de 870 kt pour le cuivre (USGS 2021), d'une ressource identifiée de 2100 kt et d'une ressource non observée mais estimée de 3100 kt. Pour le lithium, la réserve à ce jour est de 21 Mt et la ressource est de 86 Mt (USGS 2021).
- Dans l'outil négaMat, le montant disponible de la ressource est une hypothèse ajustable qui peut être modifiée en fonction du scénario prospectif. Par exemple, le scénario négaWatt considère que l'ouverture incontrôlée de nouvelles mines peut mettre en danger l'utilisation des terres, la biodiversité et la vie des populations autochtones, et limite donc volontairement ce paramètre à la réserve actuelle (et non à la ressource estimée).

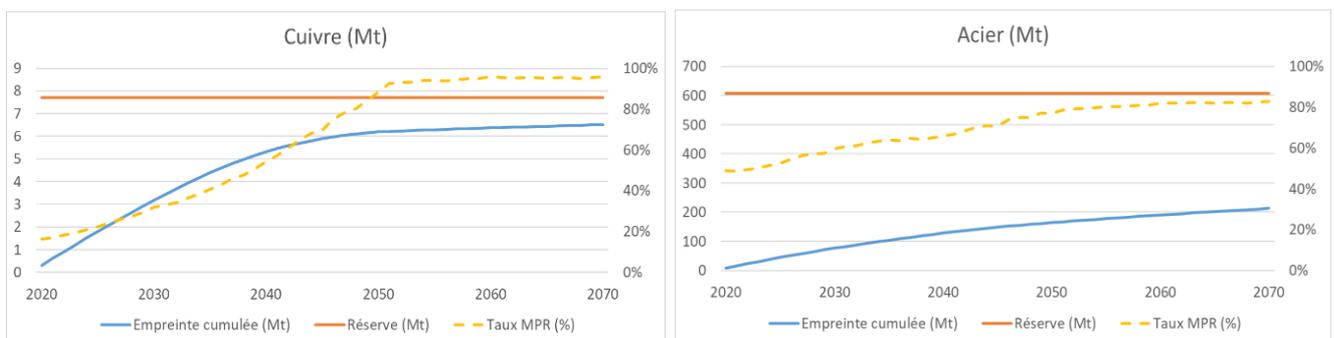


Figure 3 : Évolution de l'empreinte matériau cumulée et comparaison avec le quota équitable de réserve pour le cuivre et l'acier primaire. La courbe jaune en pointillé montre également l'évolution du taux d'incorporation de matières premières recyclées.

¹¹ Équivalent en matières premières

¹² Institut canadien des mines.

<http://minesqc.com/en/informations-sheets/what-are-mineral->

<resources-and-mineral-reserves-what-is-the-difference-between-them/>

- Quel serait un quota de réserve équitable pour le pays (ou la région) étudié ? L'accès aux ressources matérielles est très injuste aujourd'hui, et il ne serait pas viable de supposer que la situation actuelle puisse perdurer. Si nous voulons respecter les ODD¹³ et le scénario SSP1¹⁴ compatible avec 1,5°C défini par le GIEC (GIEC 2021), la logique veut que l'accès aux quantités matérielles disponibles soit plus égalitaire, par exemple que celles-ci soient proportionnelles à la population en tout point de la planète. Par exemple, dans un monde de 7,87 milliards d'habitants, la France compte 67,4 millions d'habitants, soit 0,86 %. Le quota de réserve équitable pour le cuivre est alors de $0,86\% \times 870 = 7,45$ Mt, et pour le lithium $0,86\% \times 21000 = 180$ kt. D'autres approches de redistribution pourraient être envisagées, comme la prise en compte des responsabilités passées dans l'utilisation des ressources (mais ce n'est pas ce qui a été retenu dans le scénario négaWatt).

La figure 3 montre la comparaison de l'évolution cumulée de l'empreinte matériau de la France avec une allocation équitable de la ressource au pays, dans le cadre du scénario négaWatt 2021 et pour deux matériaux courants : le fer et le cuivre.

Elle révèle que le fer n'est pas vraiment un matériau critique. En 2070, l'empreinte cumulée du fer représente un quart de la quantité de la réserve équitablement allouée. Grâce à un recyclage très optimisé (taux d'incorporation de 85 %), le rythme de progression nous laisse une marge de 500 ans, ce qui est bien au-delà du prévisible. En revanche, le cuivre mérite une attention particulière. Pour limiter sa croissance, un effort important est nécessaire et possible. En particulier, le cuivre peut être substitué par l'alumine dans les réseaux électriques et par les plastiques pour la plomberie. En outre, on suppose que le taux d'incorporation du recyclage sera de 95 % en 2045. Avec ces conditions, on obtient une évolution presque asymptotique proche de 80 % de la réserve. Le faible taux de progression à partir de 2050 nous laisse une marge d'une centaine d'années avant l'épuisement des stocks.

Discussion sur les impacts en matériaux de la transition énergétique

En plus des résultats déjà présentés précédemment (qui ont servi d'illustrations aux étapes méthodologiques de négaMat), nous utilisons l'outil pour discuter plus en profondeur de deux préoccupations communes concernant la transition énergétique : un approvisionnement 100 % renouvelable est-il matériellement réalisable, et risquons-nous de manquer de lithium si nous passons à

une électromobilité totale ? D'autres questions seraient sans doute aussi intéressantes, mais cela dépasserait le cadre de cet article.

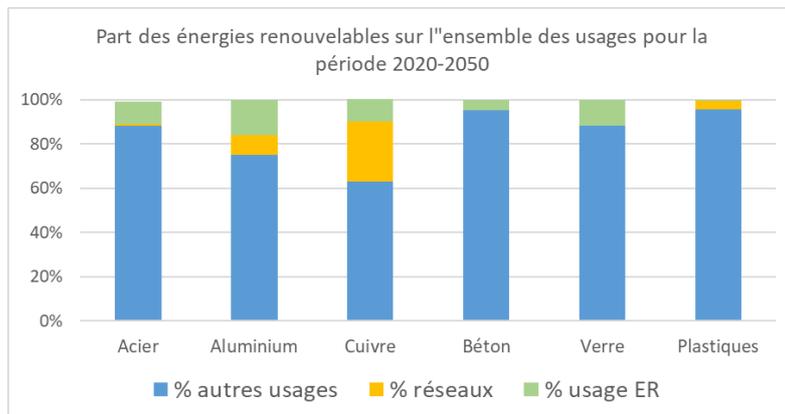


Figure 4 : Comparaison relative de la production d'énergie, des réseaux et des autres usages des différents matériaux cumulés sur la période 2020-2050 dans le cadre du scénario négaWatt 2022 de développement des énergies renouvelables.

Impact du développement des énergies renouvelables sur les matériaux

En ce qui concerne les énergies renouvelables, notre analyse porte sur l'installation en France entre 2020 et 2070 d'éoliennes, de panneaux photovoltaïques, de digesteurs de méthanisation et de centrales au biogaz pour un éventuel secours. La puissance du réseau est censée passer de 132 GW en 2019 à 295 GW en 2050. Les installations de stockage, telles que les électrolyseurs, les installations de méthanation, ainsi que les batteries stationnaires sont également envisagées.

Les réseaux électriques ont également été inclus. Comme il est difficile de prévoir comment les réseaux électriques évolueraient même sans le développement des énergies renouvelables, nous avons pris en compte également la demande totale de maintenance (remplacement des câbles) et de nouvelles connexions par rapport à aujourd'hui.

Sur la figure 4, on peut noter que la production d'électricité et les réseaux électriques ne nécessitent que 10 à 15 % de l'ensemble de l'acier, du béton, du verre et des plastiques. Pour le béton, ce n'est que 5 %, les 95 % restants étant utilisés pour les bâtiments, les routes, les ponts, etc. Pour les plastiques, la proportion n'est que de 4 %. Pour l'aluminium (qui n'est pas un matériau critique), le taux est de 22 % en raison des cadres des panneaux photovoltaïques et du remplacement du cuivre dans les câbles.

¹³ Objectifs de développement durable de l'ONU

¹⁴ Parcours socio-économique partagé

En ce qui concerne le cuivre, nos résultats de taux de masse (kg/MW) sont très similaires au scénario de l'AIE (AIE 2021b) pour le PV et les éoliennes. Bien que la portée géographique soit différente, l'utilisation du cuivre pour les énergies renouvelables d'ici 2040 est de 6 % de la quantité globale pour le scénario SDS (IEA 2021b) et de 10 % pour négaMat, Pour le

développement des réseaux électriques, ces parts sont respectivement de 30 % et 26 % (également comparables), mais sans certitude sur la part exacte due aux énergies renouvelables par rapport aux autres améliorations du réseau. L'AIE précise qu'aucune pénurie de ressources n'est attendue, mais que la qualité du minerai va diminuer.

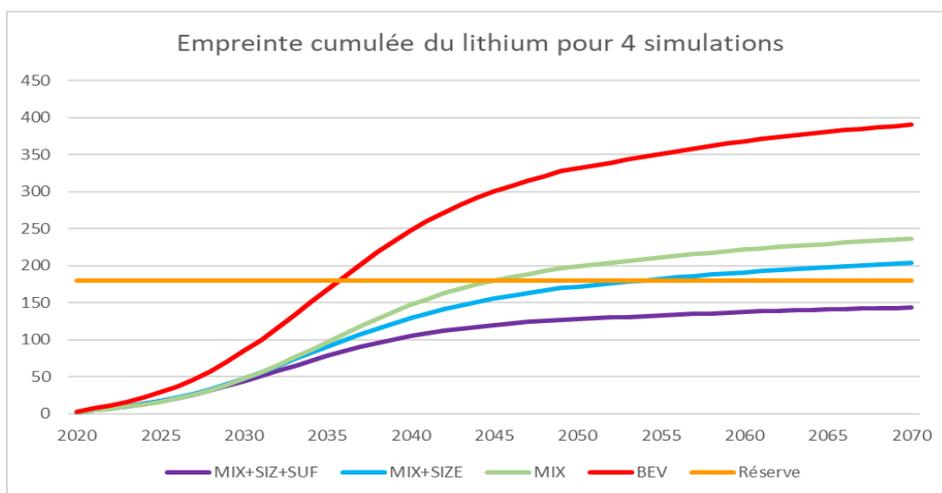


Figure 5 : Évolution de l'empreinte matérielle cumulée du lithium pour 4 scénarios de mobilité : FULL BEV = tout électrique sans sobriété. MIX = mélange d'électrique et hybride avec biogaz. MIX+SIZE = MIX + optimisation de la taille du véhicule. MIX+SIZE+SUF = MIX+SIZE+sobriété (réduction de l'utilisation de la voiture individuelle et augmentation du covoiturage).

Qu'en est-il des matériaux critiques ?

L'outil négaMat peut également être utilisé pour étudier les besoins en métaux critiques, notamment en terres rares. Cependant, pour la France, les données statistiques ne sont pas suffisamment précises et il faut extrapoler à partir de données plus globales. La technologie conventionnelle du silicium (mono et polycristallin) représente 5,49 % du marché des panneaux photovoltaïques en Europe (JRC 2020). Contrairement aux autres technologies (couches minces), les panneaux en silicium ne contiennent pas de terres rares ou de métaux critiques. Une attention particulière doit être portée à l'argent, qui a vu sa part diminuer en 10 ans, passant de 70 à 15 t/GW en 2020, et qui atteindra probablement 3 t/GW en 2040 grâce à l'évolution technologique (JRC 2020). Le besoin cumulé de panneaux jusqu'en 2070 dans le scénario négaWatt, en tenant compte du *repowering*, est de 184 GW, ce qui nécessiterait environ 1 000 t d'argent, soit un quart du quota de réserve justement attribué à la France. Cette proportion sera considérablement réduite avec un recyclage accru des panneaux.

La teneur en métaux critiques dans les éoliennes (néodyme, dysprosium, praséodyme, terbium et molybdène) varie considérablement d'une technologie à l'autre (CCR 2020). Il est nécessaire d'établir une prévision des parts de marché pour les différentes technologies, comme le propose un rapport du CCR (CCR 2020). L'application de ces prévisions dans le cadre du scénario négaWatt conduit à prévoir 65,7 GW à terre et 41,1 GW en mer, y compris le *repowering*, entre 2020 et 2070. La quantité de néodyme nécessaire varie entre 6,4 % et 10,3 % d'une réserve estimée à 99500 t¹⁵ (BRGM 2015), un taux qui ne tient pas compte des progrès potentiels du recyclage du néodyme dans le futur.

En conclusion, il ne semble pas y avoir de risques excessifs de pénurie de matériaux conventionnels ou critiques dans l'adoption massive des énergies renouvelables. Toutefois, l'amélioration et l'augmentation du recyclage seront évidemment les bienvenues.

¹⁵ Réserve de 13,5 Mt d'oxyde ou 11,6 Mt de néodyme avec une allocation de 0,86 % pour la France

Les contraintes matérielles de la mobilité électrique

Pour les transports, nous avons étudié l'impact du développement des batteries sur le cobalt et le lithium. Les parts de marché futures des différentes technologies de batteries diffèrent d'une source à l'autre (T&E 2021 ; IEA 2021b ; Mc Kinsey 2018), mais elles prévoient toutes de nouveaux progrès techniques. Nous avons sélectionné NMC333, NMC811 et LFP¹⁶ avec des hypothèses d'amélioration du rendement.

Pour examiner l'influence de différents paramètres, quatre simulations ont été réalisées pour l'ensemble de la mobilité terrestre en France métropolitaine, résumées dans la figure 5. Le paramètre commun à ces simulations est une hypothèse ambitieuse de recyclage du lithium dès 2025.

Les résultats de la modélisation montrent que :

- La simulation FULL BEV suppose une mobilité sans sobriété où les véhicules thermiques sont entièrement remplacés par des véhicules électriques d'ici 2050. Dans ce scénario, la France dépasserait sa réserve équitable de lithium dès 2035. Si tous les pays développés suivent cette voie, des tensions sur les réserves de lithium et entre pays seraient probables et commenceraient probablement plus tôt que la disponibilité de toute nouvelle technologie de batteries ou de motorisation. Cela conduirait à un épuisement dangereux et risqué de la ressource, et ne constituerait pas un modèle de mobilité durable pour le monde.
- La simulation MIX suppose un passage modéré à l'électricité avec une proportion de véhicules BEV¹⁷, PHEV¹⁸ et HEV¹⁹, le reste étant alimenté par du biogaz. Si l'on compare le poids d'une batterie NMC811 pour une berline BEV (275 kg) à celui d'un PHEV (67 kg) et d'un HEV (13 kg), il est facile de comprendre que ce mélange réduit considérablement la pression sur le lithium. Néanmoins, le quota de réserve équitable est toujours atteint en 2050.
- La simulation MIX+SIZE prévoit également une modération de la taille et du poids des véhicules par une meilleure adéquation de la taille à l'usage. Avec une autonomie de 600 km, une berline destinée aux trajets interurbains aura une batterie pesant 275 kg en moyenne. Pour une petite citadine, ce poids n'est que de 47 kg ! En différenciant ces catégories de véhicules, le scénario MIX+SIZE fait de nouveaux progrès. Toutefois, la réserve est encore atteinte en 2070.

- La simulation MIX+SIZE+SUF (c'est-à-dire le scénario négaWatt) ajoute les tendances clés de la sobriété (moins de voitures, plus d'autopartage) telles que décrites à l'étape 1. Ces tendances permettent une évolution asymptotique de l'empreinte lithium en dessous de la réserve, à laquelle un niveau croissant de recyclage permettrait d'atteindre la durabilité d'ici la fin du siècle.

Ces résultats frappants sont partagés par d'autres études. Une extrapolation du scénario SDS de l'AIE (AIE 2021) conduit à une consommation primaire mondiale de lithium d'environ 10 Mt en 2040 (la moitié des réserves prouvées). Le recyclage y contribue à hauteur de 6 %. 93 % de la quantité est utilisée pour les voitures électriques. Ces résultats semblent cohérents avec nos simulations négaMat : en 2040, 55 % de la réserve mondiale est déjà consommée. Après 2040, le rapport de l'AIE met en garde contre une demande croissante et des goulets d'étranglement potentiels au niveau de l'approvisionnement en matières premières.

Limites

Avec environ 800 paramètres, et pour chacun, des hypothèses annuelles sur 50 ans, négaMat est un puissant outil de simulation des matériaux "du berceau à la tombe". Il contribue à mieux analyser les impacts et l'empreinte matériau des scénarios de transition énergétique, ainsi que les conséquences industrielles d'une approche fondée sur la sobriété, l'efficacité, l'économie circulaire et les énergies renouvelables.

Compte tenu de la complexité de la tâche consistant à modéliser finement tous les aspects liés aux matériaux et à la consommation de biens, cet outil présente des limites méthodologiques. Parmi les principales d'entre elles :

- Les matrices de relation matériau / BEC ont été construites en croisant la distribution des utilisations d'un matériau (approche *top down*) et la composition moyenne d'un produit (approche *bottom up*). Le compromis qui en résulte conduit à des incertitudes, qui devraient idéalement être quantifiées afin d'évaluer la robustesse globale de la modélisation.
- Même si les prévisions de substitution de matériaux sont réalisables pour les principaux secteurs tels que la construction, les transports, l'énergie et l'emballage, il serait utile d'étendre le champ d'application à d'autres groupes de produits.

¹⁶ NMC = Nickel Manganèse Chrome ; LFP = Lithium Fer Phosphore

¹⁷ Véhicule électrique à batterie

¹⁸ Véhicule électrique hybride rechargeable

¹⁹ Véhicule électrique hybride

- Certains secteurs, tels que les technologies numériques comprennent des produits très différents, et leur consommation de matériaux ne fait l'objet que d'une moyenne. L'évolution de la moyenne dans les hypothèses ne tient pas pleinement compte des substitutions potentielles de matériaux et du remplacement de certains produits par d'autres. Dans tous les cas, prévoir l'avenir des appareils numériques est une tâche très délicate compte tenu de la rapidité du développement technologique dans ce secteur.
- Le niveau de modélisation n'est pas toujours suffisant pour prendre en compte les matériaux précieux ou rares. Pour analyser des métaux tels que l'indium, l'or ou les terres rares, il serait nécessaire de développer des modules supplémentaires (pour lesquels les données statistiques sont parfois obsolètes, voire inexistantes).
- L'outil a été conçu pour fonctionner avec différents types de scénarios et d'hypothèses. Sa mise en œuvre dans d'autres États membres de l'UE a été envisagée dans le cadre de la préparation d'un important scénario européen de transition énergétique actuellement mené par l'Association négaWatt avec de nombreux partenaires (Marignac et al 2021). Cependant, elle se heurte à des obstacles liés à l'accès aux données et à des problèmes de recoupement. Une meilleure compréhension de ces difficultés méthodologiques permettrait d'améliorer la reproductibilité de l'approche négaMat.
- D'autres comparaisons de nos résultats avec d'autres études et scénarios seraient très utiles et pourraient renforcer la robustesse de notre outil. Cependant, ces comparaisons sont souvent complexes d'un point de vue méthodologique, car les études disponibles varient en termes de périmètres géographiques, de portée de l'analyse des flux de matières et de l'empreinte, d'hypothèses de transition énergétique et d'approches des réserves de matières. Cela nécessiterait une analyse approfondie et l'accès aux données de modélisation détaillées et aux hypothèses de chaque étude. Cela pourrait être le sujet d'une activité de recherche et d'un article futur.

Conclusion

négaMat est un outil ambitieux, en cours de développement, qui n'a pas encore atteint tous ses objectifs. L'une de ses importantes valeurs ajoutées à ce jour est qu'il permet de distinguer plus clairement les

contributions de la sobriété, de l'efficacité, de l'économie circulaire, du commerce international et de la relocalisation industrielle lors de l'évaluation des impacts énergétiques et matériaux des scénarios prospectifs. Il a été un complément précieux aux scénarios de transition énergétique tels que le scénario négaWatt pour la France.

Il permet également d'identifier les secteurs et les tendances qui ont le plus grand impact potentiel sur la consommation de matériaux, ainsi que les activités industrielles qui nécessitent une attention particulière dans le cadre de la transition énergétique. Par exemple, négaMat peut évaluer l'impact de la modération des besoins de construction de nouveaux bâtiments et de l'encouragement des rénovations, ainsi que de la promotion de la sobriété, du transfert modal et de l'électrification de la mobilité.

Parmi nos principales conclusions figure la comparaison de ces besoins en matériaux avec les réserves disponibles. Appliqués à la France et au scénario négaWatt, et en tenant compte d'une répartition équitable des réserves mondiales par habitant, nous avons constaté qu'il ne devrait pas y avoir de risques excessifs de pénurie pour les matériaux conventionnels, à l'exception du cuivre. Pour ce dernier, la substitution de l'aluminium dans les réseaux électriques et des niveaux élevés de recyclage seront essentiels. En ce qui concerne les matériaux critiques, un scénario 100 % renouvelable ne devrait pas entraîner de risques excessifs d'épuisement des ressources. Toutefois, la situation est beaucoup plus tendue pour le lithium et le cobalt si l'on passe à grande échelle aux véhicules électriques. Cette évolution ne serait durable que si d'importantes mesures de sobriété sont prises dans le secteur de la mobilité, si la taille des véhicules est limitée et si l'électrification est complétée par d'autres systèmes de propulsion (par exemple, à base de biogaz).

D'autres activités et développements sont prévus à l'avenir, comme l'utilisation de l'outil pour comparer les impacts d'autres scénarios de transition en France (RTE²⁰ et SNBC actualisée²¹) ou au niveau européen (sous réserve de la disponibilité de données suffisantes). Une collaboration avec des économistes de l'Institut Rousseau²² est également en cours pour évaluer les investissements financiers nécessaires pour réaliser les mutations matérielles et industrielles qui ont été évaluées par négaMat.

²⁰ Réseau de transport d'électricité : voir <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>

²¹ Stratégie Nationale Bas Carbone : voir <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

²² <https://institut-rousseau.fr/>

Références

- ADEME, 2020. Transition industrielle - Prospective énergie matière : Vers un outil de modélisation des niveaux de production.
- ADEME, 2021. Prospective Transition 2050.
- Antoine Beylot, Dominique Guyonnet, Stéphanie Muller, Stéphane Vaxelaire, Jacques Villeneuve, 2019. Besoins en matières premières minérales et impacts associés sur le changement climatique de la transition énergétique française à l'horizon 2050. *Journal of Cleaner Production, Volume 208*.
- BRGM, 2015. Fiche de synthèse sur la criticité des métaux - Le néodyme.
- EUROSTAT, 2017. Documentation du modèle RME de l'UE.
- EUROSTAT, 2018. Manuel des comptes de flux de matières à l'échelle de l'économie.
- HCP, 2021. Reconquête de l'appareil productif : la bataille du commerce extérieur.
- AIE, 2021a. Documentation sur le modèle énergétique mondial.
- AIE, 2021b. Le rôle des minéraux critiques dans les transitions énergétiques.
- GIEC, 2021. Changement climatique - La base scientifique physique.
- CCR, 2018. Vers des indicateurs de recyclage basés sur les flux de l'UE et les données de l'analyse du système des matières premières.
- CCR, 2020. Demande de matières premières pour les technologies éoliennes et solaires photovoltaïques dans le cadre de la transition vers un système énergétique décarboné.
- Yves Marignac, Stéphane Bourgeois, Mathilde Djelali, Nicolas Taillard, Janis Brizga, Marta Garcia, Radu Dudau, Luisa Cordroch, Dimitri Lalas, Yves Marenne, Gunnar Boye Olesen, Philippe Bovet, Yannis Sarafidis, Silvia Erba, Lorenzo Pagliano, Léo Coppens, Benjamin Best, Johannes Thema, Francisco Ferreira, 2021. Scaling-up energy sufficiency on a European level through a *bottom up* modelling approach: lessons and perspectives. *Actes de la conférence eceee Summer Study*.
- Mc Kinsey, 2018. Le lithium et le cobalt : Un conte de deux matières premières.
- Association négaWatt, 2018. L'autosobriété énergétique.
- Association négaWatt, 2021. Scénario négaWatt 2022
- SOLAGRO, 2016. Le scénario Afterres 2050.
- Stefan Pauliuk, Niko Heeren, Peter Berrill, Tomer Fishman, Andrea Nistad, Qingshi Tu, Paul Wolfram & Edgar G. Hertwich, 2021. Scénarios mondiaux d'économies de ressources et d'émissions grâce à l'efficacité des matériaux dans les bâtiments résidentiels et les voitures. *Nature communications*.
- T&E - Transport and Environment, 2021, From dirty oil to clean batteries.
- USGS, 2021. Sommaires des produits minéraux.
- Takuma Watari, Benjamin C. McLellan, Damien Giurco, Elsa Dominish, Eiji Yamasue, Keisuke Nansai, 2019. Besoin total en matériaux pour la transition énergétique mondiale à l'horizon 2050 : Un focus sur les transports et l'électricité. *Ressources, Conservation et Recyclage, Volume 148*.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement tous les experts qui ont contribué à cet article et à l'outil négaMat, en particulier Adrien Toledano, Adrien Jacob, Thierry Hanau et Stéphane Chatelin.