Groupe de travail n°2
« consommation d'électricité »

●

Trajectoire de consommation électrique du secteur industriel pour l'horizon d'étude 2050

Mars 2021

Table des matières

1 Contexte 3

1.1 Cadre général 3

2 Historique de la consommation d'électricité dans l'industrie 5

3 Premières analyses sur l'évolution de la production industrielle 9

3.1 Rappel du contexte 9

3.2 Eléments de méthode 10

3.3 Analyse des débouchés des productions des IGCE 12

3.3.1 Construction 12

3.3.2 L'emballage 14

3.3.3 Les engrais 15

3.3.4 Le transport 16

3.3.5 La production EnR 20

3.4 Estimation de la production des ICGE 22

3.4.1 Production de clinker 22

3.4.2 Production d'acier 23

3.4.3 Production d'aluminium 24

3.4.4 Production de verre 26

3.4.5 Production de chlore 27

3.4.6 Production d'ammoniac 28

3.4.7 Production d'éthylène 29

3.4.8 Production de papier-carton 30

3.4.9 Production de sucre 31

3.5 Approche pour l'industrie diffuse 32

3.5.1 Evolution de la valeur ajoutée 32

3.5.2 Effets volume et structure sur la consommation électrique de l'industrie 33

3.6 Impact du recyclage 34

3.7 Impact de l'efficacité énergétique 35

3.8 Impact de l'électrification des procédés 38

3.9 Impact de l'électrification des besoins de chaleur 41

3.10 Synthèse des consommations du secteur industriel 42

1 Contexte

1.1 Cadre général

Dans le cadre de ses missions et conformément au Code de l'énergie, RTE établit périodiquement un Bilan prévisionnel pluriannuel de l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité en France. Celui-ci contribue à l'élaboration de la politique énergétique, en éclairant le paysage du système électrique à long terme.

Le prochain Bilan prévisionnel à long terme intégrera un volet portant sur l'horizon 2050 et proposera des scénarios d'évolution possibles du mix électrique français, dans un contexte de transition énergétique et d'ambition de l'atteinte de la neutralité carbone de la France à ce même horizon, portée par la Stratégie nationale bas carbone (SNBC).

La **Stratégie nationale bas carbone (SNBC)** est une feuille de route pour la France portant sur l'ensemble des filières énergétiques et visant à une économie bas carbone, conformément aux objectifs européens et internationaux (paquet énergie-climat européen, accord international de Paris à la COP21, etc.). La dernière révision, dont le projet a été rendu public fin 2018, a pour objectif d'atteindre une neutralité carbone de la France en 2050 et fournit les grandes lignes en matière de transformation de la mobilité, des logements, de l'industrie, de l'agriculture, etc. L'atteinte de l'objectif passe notamment par une électrification massive des usages assortie d'une décarbonation complète de la production électrique.

La **Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)** est une déclinaison opérationnelle de la Stratégie nationale bas carbone pour le secteur de l'énergie et fixe la trajectoire énergétique de la France pour les périodes 2019-2023 et 2024-2028. Elle est donc définie en cohérence avec la SNBC. En particulier, les hypothèses de demande sont communes entre les deux exercices.

Pour ce faire, le Bilan prévisionnel est adossé à une modélisation détaillée de l'ensemble des composantes du système et en particulier de l'offre et de la demande, requérant un volume important de données produites par RTE ou provenant de multiples acteurs du secteur (estimations sectorielles sur les réseaux de distribution transmises par Enedis et les entreprises locales de distribution, bases de données CEREN…). En outre, RTE dispose, d'une part, d'informations qui lui sont communiquées sous couvert de confidentialité lors de consultations bilatérales avec des acteurs du secteur de l'énergie, d'autre part, des retours obtenus lors des consultations collégiales en Commission « Perspectives système et réseau ».

Dans la continuité de sa démarche de transparence et d'alimentation du débat public sur l'énergie, RTE anime, sous forme de groupes de travail, des consultations collégiales sur certaines thématiques à fort enjeu pour l'évolution du système électrique. A la demande de plusieurs parties prenantes, la décision a été adoptée, lors de réunion plénière de la Commission « Perspectives système et réseau » du 28 septembre 2018, de lancer un groupe de travail sur l'élaboration des trajectoires de consommation à long terme (GT2).

En effet, la consommation d'électricité[1], de par ses disparités sectorielles, présente une complexité qui appelle à un partage approfondi des hypothèses et de la méthodologie de modélisation avec les acteurs.

Etant donné l'ampleur des travaux menés par RTE sur la consommation électrique, le choix a été fait de scinder ce sujet en différentes thématiques clés, abordées tour à tour lors des consultations collégiales à venir.

Les cinq premières réunions du groupe de travail ont été consacrées à la présentation des principes de modélisation pour les différents secteurs et usages, plus précisément :

- aux usages thermiques du secteur résidentiel (réunion du 15 mars 2019) ;
- aux usages spécifiques du secteur résidentiel (réunion du 24 mai 2019) ;
- au secteur tertiaire (réunion du 16 septembre 2019) ;
- au secteur industriel et de l'énergie (réunion du 18 octobre 2019) ;
- au secteur du transport, à un retour sur les contributions reçues et aux orientations méthodologiques pour élaborer des trajectoires à l'horizon 2050 (réunion du 14 avril 2020) ;
- aux premières trajectoires dans les secteurs résidentiel et tertiaire pour l'horizon d'étude 2050 et aux premières analyses de l'évolution de la production industrielle (réunion du 18 septembre 2020).

Le présent document porte sur une première proposition de trajectoire de consommation dans le secteur industriel, reprenant le cadre général et les hypothèses connues de la SNBC. Il est complété par un autre document de cadrage (commun aux GT2 & 3) portant spécifiquement sur les perspectives de réindustrialisation à long terme et les enjeux en matière de bouclage énergétique des scénarios.

Après un bref rappel de l'historique sur la consommation d'électricité de l'industrie (partie 2), la suite du document présente l'analyse de l'évolution de la production industrielle au travers d'une approche par quantités physiques (sections 3.1 à 3.5) : cette partie avait déjà été exposée lors de la précédente réunion du groupe de travail (le 18 septembre 2020). Dans les parties suivantes, les différents effets affectant l'intensité électrique de l'industrie – amélioration de l'efficacité énergétique, recyclage, électrification des procédés, électrification des besoins de chaleur – sont analysés et présentés à la concertation.

[1] *La consommation électrique considérée dans ce document concerne la France continentale. Elle est en outre corrigée de différents aléas conjoncturels (températures, effacements, années bissextiles) afin de révéler ses évolutions structurelles.*

2 Historique de la consommation d'électricité dans l'industrie

Consommation d'électricité de l'industrie en 2019

Le secteur industriel a représenté en 2019 une consommation d'électricité de 113,2 TWh, soit un peu moins de 24% de la demande intérieure d'électricité en France continentale.

Le secteur industriel considéré dans ce document recouvre toutes les entreprises de France continentale, alimentées sous une tension supérieure à 36 kVA[2], et dont l'activité fait partie des classes de la Nomenclature d'activités économiques pour l'étude des livraisons et consommations d'énergie (NCE)[3] allant de 12 à 38. Le tableau ci-dessous fournit la liste des NCE de l'industrie.

Liste des NCE de l'industrie

NCE	Libellé
12	Industrie laitière
13	Sucreries, raffineries de sucre
14	Industries alimentaires (sauf laiteries, sucreries)
16	Sidérurgie
18	Première transformation de métaux non ferreux
19	Production de minéraux divers
20	Fabrication plâtre, chaux, ciment
21	Production matériaux de construction, céramiques
22	Industrie du verre
23	Fabrication d'engrais
24	Autres industries de la chimie minérale de base
25	Fabrication de matières plastiques, caoutchoucs synthétiques
26	Autres industries de la chimie organique de base
28	Parachimie, industries pharmaceutiques
29	Fonderie, travail des métaux
30	Construction mécanique
31	Construction électrique et électronique
32	Construction d'autres matériels de transport terrestre
33	Construction navale, aéronautique et armement
34	Industrie textile, cuir, habillement
35	Industrie du papier et du carton
36	Industrie caoutchouc
37	Transformation des matières plastiques
38	Industries diverses

Par souci de lisibilité des figures, un regroupement des NCE par grandes branches d'activité est proposé dans la suite de ce document (cf. tableau ci-après).

[2] *Les entreprises alimentées en basse tension (moins de 36 kVA) sont considérées comme relevant de l'artisanat et sont traitées dans le secteur tertiaire.*

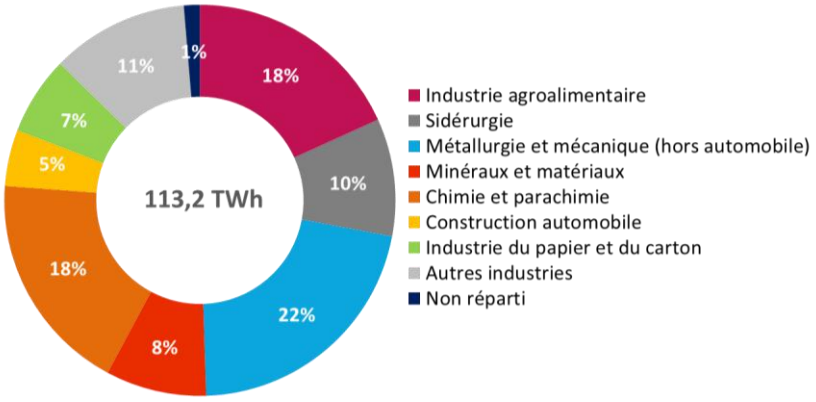
[3] *Il s'agit d'une nomenclature d'activité particulière pour les consommations d'énergie. Il existe une table de correspondance entre la NCE et la NAF rév. 2, accessible sur le site de l'INSEE :* https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/3364874/irecoeacei16_correspondance_NCE_NAF-1.pdf

Regroupement des NCE par grandes branches industrielles

	NCE
Industrie agroalimentaire	12 ; 13 ; 14
Sidérurgie	16
Métallurgie et mécanique (hors industrie automobile)	18 ; 29 ; 30 ; 31 ; 33
Minéraux et matériaux	19 ; 20 ; 21 ; 22
Chimie et parachimie	23 ; 24 ; 25 ; 26 ; 28
Construction automobile	32
Industrie du papier et du carton	35
Autres industries	34 ; 36 ; 37 ; 38

Près de 60% de la consommation d'électricité de l'industrie est concentrée sur trois grandes branches d'activité : la métallurgie et la mécanique (hors automobile), la chimie et l'industrie agroalimentaire.

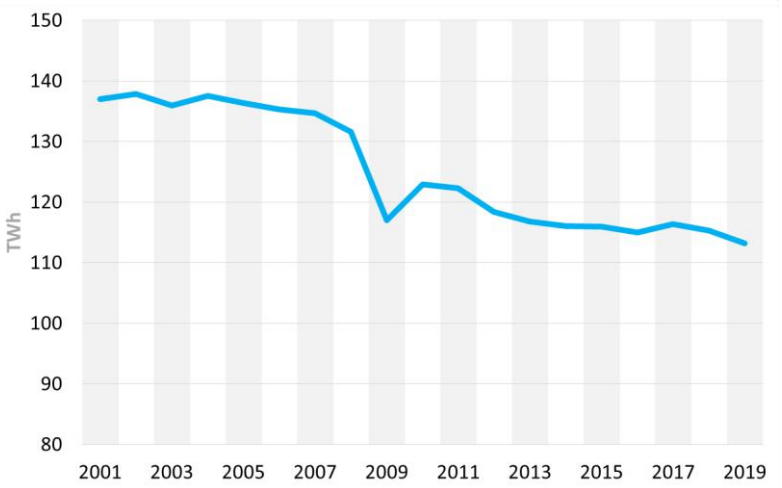
Répartition par branches de la demande électrique industrielle pour l'année 2019[4]



La consommation d'électricité du secteur industriel a connu une baisse quasi continue depuis le début des années 2000, entrecoupée par l'effet de la crise économique des *subprimes* qui s'est traduite par une contraction brutale de 14 TWh en 2009. Depuis 2010, la demande électrique industrielle s'est ainsi réduite de près de 8%, et ce malgré un léger rebond en 2017 (cf. figure ci-après).

[4] *Un volume de consommation, relativement limité (de l'ordre de 1% de la consommation totale industrielle), ne peut être réparti par activité faute de données statistiques. Il correspond en grande partie à l'autoconsommation HTA des clients industriels.*

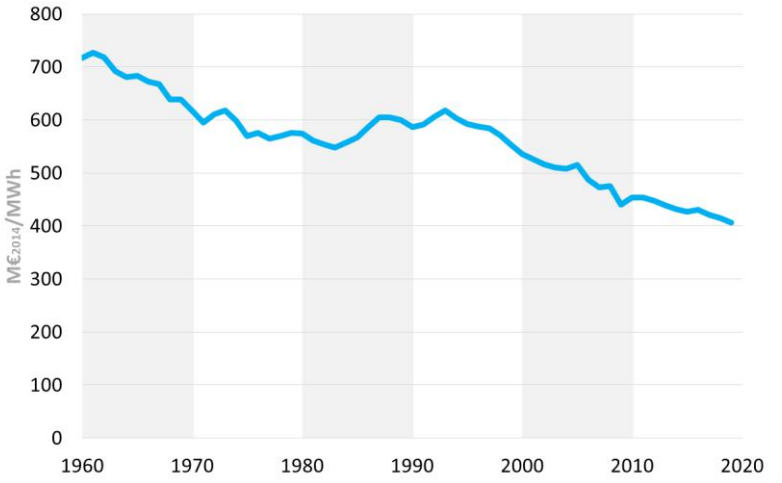
Évolution de la demande électrique industrielle



Cette baisse s'explique par les effets conjugués :

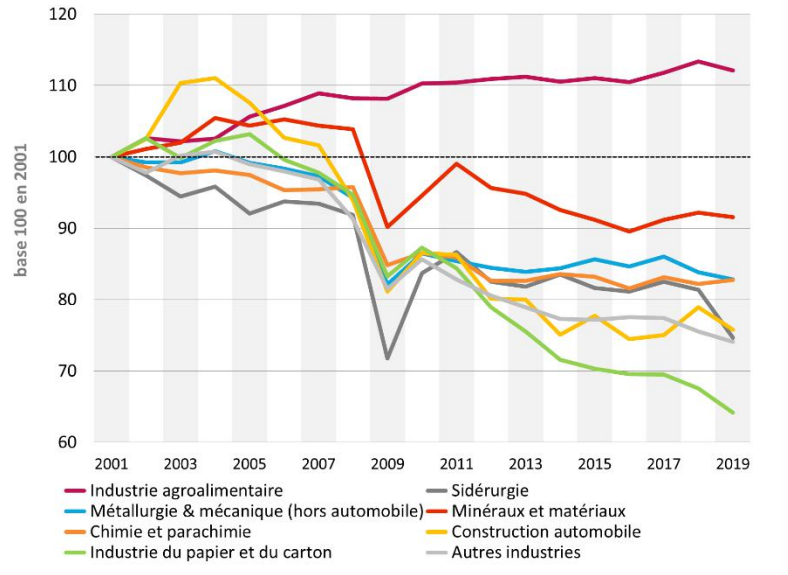
- d'une dynamique de la production industrielle en volume relativement atone, moindre que celle du PIB ;
- du déplacement de l'activité des industries lourdes fortement consommatrices d'énergie vers des industries plus légères, voire d'une certaine désindustrialisation ;
- des actions d'efficacité énergétique qui ont contribué à faire décroître l'intensité électrique de l'industrie (la baisse de celle-ci a été légèrement supérieure à 1,5% par an en moyenne au cours des vingt dernières années – cf. figure ci-dessous).

Évolution de l'intensité électrique industrielle



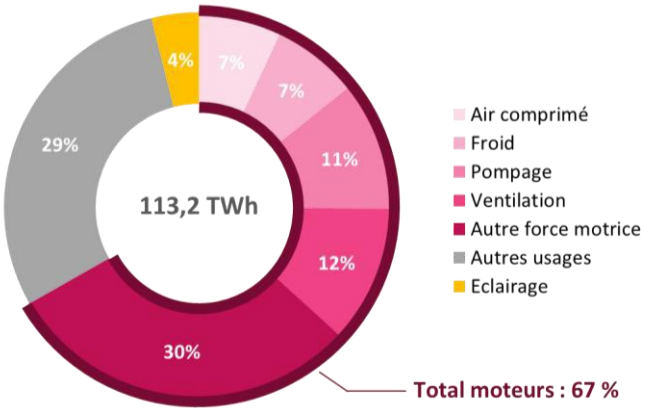
Cette tendance baissière de la demande électrique s'observe sur la totalité des grandes branches industrielles à l'exception notable de l'industrie agroalimentaire (cf. figure ci-après).

Évolutions comparées de la demande électrique des grandes branches industrielles



La consommation d'électricité est intimement liée à l'activité productrice des entreprises, mais ce lien est affecté par les évolutions structurelles de l'activité, par les substitutions entre vecteurs énergétiques, et au premier plan par l'amélioration de l'efficacité énergétique, en particulier sur les usages transverses (production d'air comprimé, de froid, pompage, ventilation, force motrice, éclairage), catalysée notamment par la directive sur l'écoconception des matériels. La consommation d'électricité industrielle est en effet majoritairement – à hauteur de deux tiers environ – due à celle des moteurs électriques utilisés pour ces usages transverses.

Répartition par usages de la demande électrique industrielle pour l'année 2019



3 Premières analyses sur l'évolution de la production industrielle

L'essentiel de ce chapitre 3 (parties 3.1 à 3.4) a déjà été exposé lors de la précédente réunion du groupe de travail (le 18 septembre 2020) et figurait dans le document de concertation diffusé à cette occasion. Ces éléments sont reproduits dans le présent document pour mémoire, afin de lui conférer un caractère autoporteur.

L'approche utilisée pour modéliser l'évolution de la production de l'industrie diffuse (partie 2.5) a en revanche fait l'objet de travaux approfondis, présentés dans le second document de concertation diffusé conjointement à celui-ci et portant sur les variantes de réindustrialisation.

3.1 Rappel du contexte

La réunion du groupe de travail « consommation » du 18 octobre 2019, consacrée à l'industrie et au secteur de l'énergie, avait été l'occasion de présenter la méthode et les hypothèses utilisées pour l'élaboration des trajectoires de consommation du Bilan prévisionnel 2017. La méthode utilisée pour projeter l'évolution de la production industrielle reposait sur le principe d'une matrice « entrées-sorties » de l'industrie, de nature à prendre en compte l'interdépendance de l'activité des différentes branches industrielles.

Cette approche simplifiée a recueilli l'assentiment des parties prenantes pour l'horizon 2035, mais nécessitait d'être réinterrogée à un horizon plus lointain comme 2050. Une approche en quantités physiques (à l'instar de celle de la SNBC), tout du moins pour les branches électro-intensives, est ainsi apparue nécessaire.

D'importants travaux d'analyse ont donc été lancés, dont les premiers résultats sont présentés ici. A ce stade, seule l'évolution de l'activité industrielle est détaillée, ainsi que son impact sur l'évolution de la consommation d'électricité (effet « volume ») : les autres effets, liés notamment à l'efficacité énergétique et aux substitutions, feront l'objet d'une présentation dans une prochaine réunion du groupe de travail.

La production industrielle dans la trajectoire AMS de la SNBC

La trajectoire AMS de la SNBC fournit les grands déterminants macroéconomiques qui la sous-tendent, avec une croissance du PIB proche de 1,6% par an en moyenne entre 2020 et 2050 et une part de l'industrie dans le PIB en très légère baisse, mais quasiment stable à 10% (ce qui se traduit par une hausse de 40% de la valeur ajoutée industrielle d'ici à 2050). Dans une variante de réindustrialisation de la France, cette part croît en revanche pour atteindre 16% en 2050.

La SNBC fournit également des éléments une estimation de l'évolution des quantités physiques de production des industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE) sur l'horizon de prévision.

Hypothèses de croissance du PIB dans la trajectoire AMS de la SNBC

	2015-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2050
TCAM du PIB	+1,6%	+1,3%	+1,4%	+1,7%

Hypothèses de production industrielle dans la trajectoire AMS de la SNBC

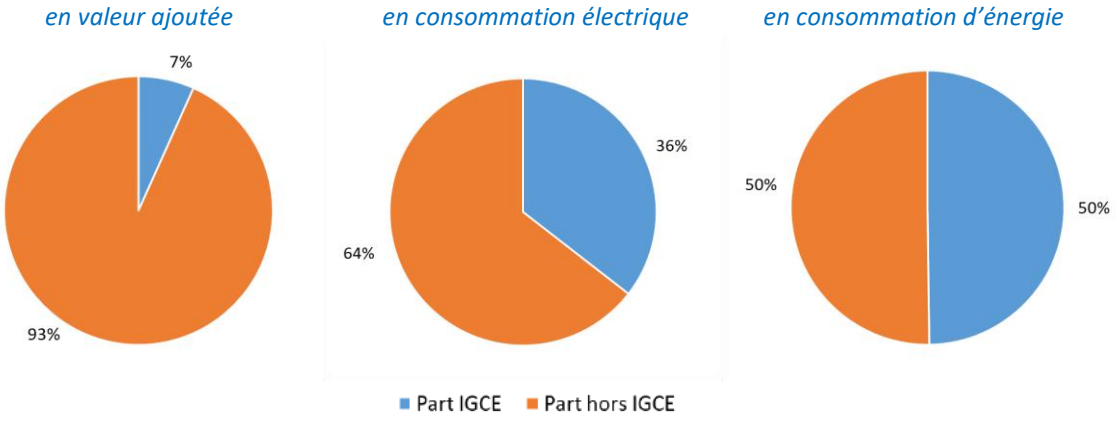
	2015	2020	2025	2030	2050
Part de l'industrie dans la valeur ajoutée	11%				10%
Production physique (Mt)					
Acier	*15,0*	*15,0*	*15,0*	*15,0*	*13,6*
Aluminium	*0,6*	*0,6*	*0,6*	*0,6*	*0,5*
Ethylène	*2,5*	*2,5*	*2,5*	*2,5*	*2,5*
Chlore	*1,0*	*1,0*	*1,0*	*1,0*	*1,0*
Ammoniac	*0,9*	*0,9*	*0,9*	*0,9*	*0,9*
Clinker	*12,5*	*14,0*	*14,0*	*14,0*	*13,0*
Verre	*4,6*	*4,6*	*4,6*	*4,6*	*4,2*
Papier	*7,9*	*7,9*	*7,9*	*7,9*	*7,9*

3.2 Eléments de méthode

L'intérêt d'adopter une approche en quantités physiques de production pour les ICGE est patente si l'on considère les caractéristiques de ces filières, à savoir une consommation énergétique très importante (plus de la moitié) au regard de leur poids limité (7%) dans la valeur ajoutée.

Les IGCE considérées ici sont la production d'acier, d'aluminium, d'éthylène, de chlore, d'ammoniac, de clinker, de verre, de papier-carton et de sucre.

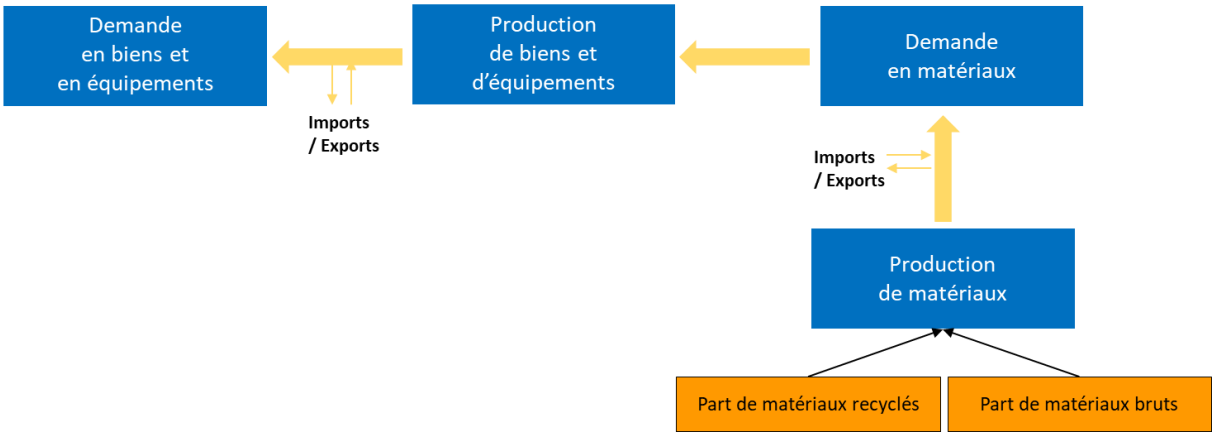
Poids relatif des IGCE dans l'industrie en 2019



De fait, une approche purement macroéconomique basée sur de grands agrégats ne saurait être à même de prendre en compte l'effet majeur sur la consommation énergétique globale de l'évolution de la production de ces filières très énergivores.

L'approche retenue pour établir une modélisation de l'évolution de la production en quantité physique des IGCE consiste à établir une projection de la demande en biens et en équipements et d'en déduire une demande en matériaux pour satisfaire cette demande. Les industries diffuses, qui recouvrent un spectre de produits beaucoup plus larges, devront être abordées sous un autre angle.

Principe général de modélisation de la production des ICGE



Pour ce faire, plusieurs hypothèses sont nécessaires :

- on assimile, sur l'horizon de prévision, la consommation apparente (c'est-à-dire : production + imports - exports) à la consommation réelle (c'est-à-dire la consommation apparente à laquelle on ajoute les variations de stock). Ne pas considérer les variations de stock est pertinent dans la mesure où la finalité est de capter les évolutions structurelles et non de décrire les fluctuations conjoncturelles, par nature non prévisibles sur un horizon de long terme ;
- on considère également que la part relative des soldes importateurs, que ce soit au niveau des matériaux ou des biens et équipements, demeure relativement constante. Cette hypothèse apparaît cohérente avec le cadrage de la trajectoire SNBC, qui table sur un relatif *statu quo* en matière de poids relatif de l'industrie (pas de relocalisation de l'industrie, et donc de baisse du solde importateur, dans cette trajectoire).

La première phase de l'analyse a consisté à étudier en détail les neuf produits des ICGE considérées, afin de déterminer dans quels secteurs ils sont utilisés et en quelle proportion. Puis, il s'est agi d'évaluer les éventuelles transformations des marchés de ces produits dans les années à venir.

Les principaux débouchés identifiés, déterminants pour l'évolution de la demande adressée aux IGCE sont les suivants :

- la construction ;
- l'emballage ;
- les engrais ;
- les transports, et en particulier l'automobile ;
- la production d'énergie.

D'autres secteurs jouent également un rôle important mais sont beaucoup plus complexes à modéliser : la chimie (pesticides, peintures, colorants, colles, produits d'entretien, cosmétiques, produits pharmaceutiques…) ainsi que les secteurs de la mécanique, de l'électricité, du textile…

D'ici à 2050, les perspectives dans chacun de ces secteurs dépendent largement de la croissance économique que connaîtra le pays, de la démographie ainsi que des mesures et changements d'habitudes qui pourront être adoptés dans un contexte de lutte contre le réchauffement climatique.

Par exemple, la loi adoptée en 2020 concernant l'économie circulaire pourrait affecter significativement le secteur des emballages.

Ces éléments, détaillés dans la suite du document, permettent de projeter l'évolution de la consommation de ces matières premières. Le but de l'exercice étant d'établir des trajectoires de production, celles-ci seront déterminées en partie par l'évolution de la consommation française, mais aussi par celle des imports et exports de chaque matériau, sous forme brute ou sous forme de produits finis. Des mesures de relocalisation pourront donc influencer le niveau de production dans les décennies à venir. Cela sera étudié notamment pour établir la variante « relocalisation » évoquée par la SNBC.

Par ailleurs, d'autres variantes seront établies, intégrant différents niveaux de sobriété, ainsi que des analyses de sensibilité sur les niveaux de croissances économique et démographique.

3.3 Analyse des débouchés des productions des IGCE

L'évolution de la demande adressée aux IGCE est fortement liée à quelques grands déterminants, présentés ci-après.

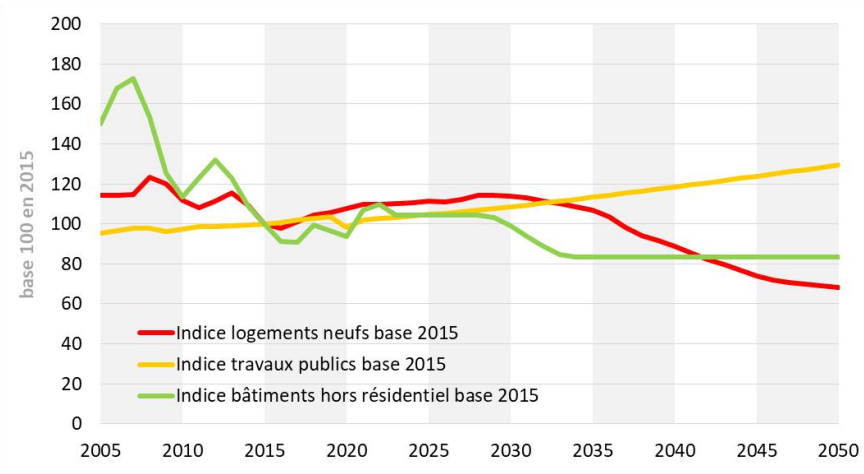
3.3.1 Construction

Le secteur de la construction constitue un important débouché pour plusieurs types de production des ICGE : le verre, l'acier, l'aluminium, le plastique et le clinker (pour ce dernier, il s'agit même du seul débouché). La demande en matières premières de ce secteur dépend essentiellement de deux facteurs : le volume de construction, et la part de marché de chaque matériau.

Le volume de construction

Le volume de construction est détaillé selon quatre types d'ouvrages : les logements neufs, les bâtiments hors résidentiel, la rénovation de bâtiments, ainsi que les travaux publics, qui pourront connaître des évolutions différentes. Alors que les travaux publics poursuivent leur croissance dans un contexte économique favorable, la construction de logements neufs ralentit. De même, le rythme de la construction neuve dans le tertiaire ralentit et se stabilise autour de 8 millions de mètres carrés par an dès 2030, pour refléter la vision de la SNBC.

Indices d'évolution de la construction



La part de marché des matériaux de construction

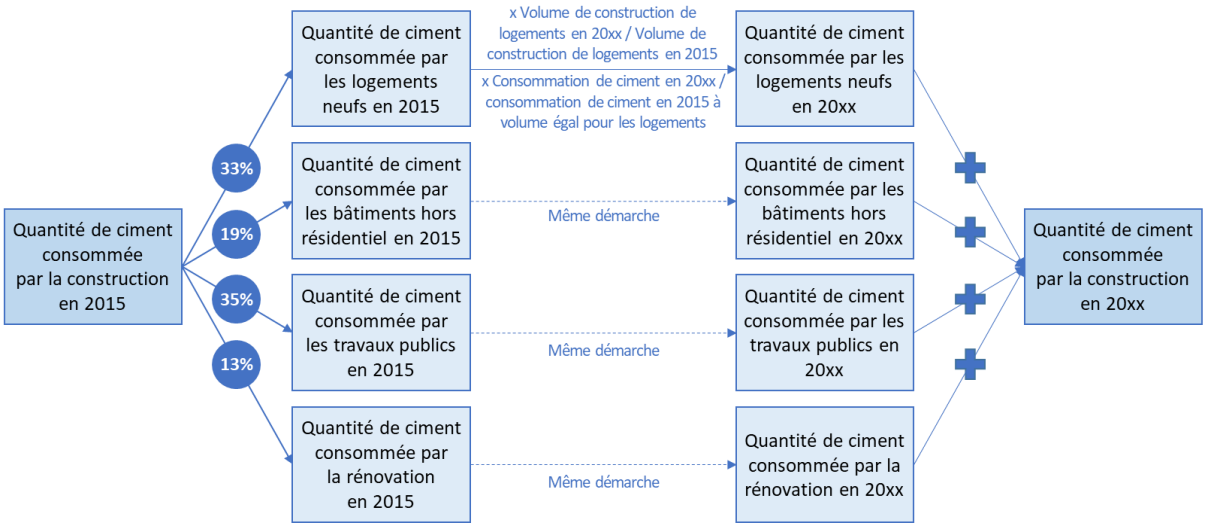
Dans un contexte de sobriété, la construction est amenée à évoluer pour réduire son empreinte environnementale et climatique, ce qui peut affecter la demande en matières premières. Les résultats de l'ADEME publiés dans le rapport *« Prospective de consommation de matériaux pour la construction des bâtiments neufs aux horizons 2035 et 2050 »* seront pris comme référence pour la définition de trajectoires. L'ADEME propose dans cette étude plusieurs scénarios, qui reposent sur les mêmes hypothèses en termes de volume de construction : l'un prévoit un « maintien des parts de marché » des différents matériaux, l'autre un « développement du bois et des matériaux biosourcés ». Ainsi, à volume construit égal, certains matériaux pourront voir leur part de marché décroître au profit de matériaux biosourcés, dont la production est moins émettrice de GES et permet le stockage de carbone, en cohérence avec les orientations de la SNBC.

Dans son étude, l'ADEME étudie l'ensemble du résidentiel, mais seulement une partie du tertiaire (commerces, hôtels, enseignement, bureaux) : les résultats concernant la modification des parts de marché des matériaux à volume construit égal dans le tertiaire ont été généralisés à l'ensemble des bâtiments hors résidentiels.

A niveau de construction équivalent, la consommation de ciment est appelée à se réduire, notamment via un recours accru à des matériaux biosourcés. L'ADEME estime ainsi que la construction des logements neufs pourrait nécessiter 8% de ciment en moins sur la période 2035-2049 par rapport à un scénario *Business As Usual*, et celle de bâtiments non résidentiels 3% en moins. De même, les besoins unitaires d'acier, d'aluminium et de verre vont avoir tendance à baisser, avec une évolution un peu plus nuancée pour le besoin en plastique dans le tertiaire.

Pour les travaux publics et la rénovation de bâtiments, les parts de marché des différents matériaux ne sont pas modifiées.

On fait donc évoluer la demande associée à la construction pour chaque matériau, annuellement, de la façon suivante :



La rénovation énergétique

A la consommation de matières premières de ces quatre secteurs va s'ajouter celle associée à la rénovation énergétique. Si elle représentait jusqu'à maintenant un volume faible, elle devrait prendre de l'ampleur et avoir un impact sur la consommation de certains isolants. En effet, la SNBC suppose que le parc de logements sera 100% BBC en moyenne en 2050. La consommation de matériaux associée aux objectifs fixés par la SNBC est inspirée du rapport de l'ADEME, publié en décembre 2019, intitulé *« Prospective de consommation de matériaux pour la rénovation énergétique BBC des bâtiments résidentiels aux horizons 2035 et 2050 »*. Cette étude fournit, pour les périodes 2018-2034 et 2035-2049, la quantité de matériaux nécessaires pour rénover au niveau BBC le parc de logement : maisons individuelles et logements collectifs. L'ADEME propose trois scénarios : un scénario de continuité, un scénario volontariste et un scénario politique, chacun associé à deux variantes : l'une tendancielle (du point de vue des matériaux utilisés), l'autre innovante. Par prudence, nous considérons les résultats avec la vision tendancielle. Le scénario politique permet d'atteindre 100 % des bâtiments antérieurs à 1975 rénovés en 2050, avec un nombre annuel de rénovations de plus de 420 000 pour la période 2018-2034 et de plus de 650 000 pour la période 2035-2049 : c'est celui-ci que nous retenons pour sa cohérence avec la SNBC.

La consommation de laine de verre associée à la rénovation énergétique en 2050 serait alors 4,6 fois supérieure à celle de 2018 avec ces hypothèses.

Hypothèses supplémentaires

L'industrie cimentière a affirmé son ambition de réduire ses émissions de CO2 de 80% à l'horizon 2050. Cela pourrait passer notamment par la réduction de la teneur du ciment en clinker, les émissions étant directement proportionnelles à cette teneur. Une hypothèse prudente d'un taux moyen de 78% réduit à 76% à terme semble réaliste (une hypothèse plus ambitieuse pourra être retenue dans des variantes).

Cette évolution est de nature à réduire les besoins unitaires de clinker.

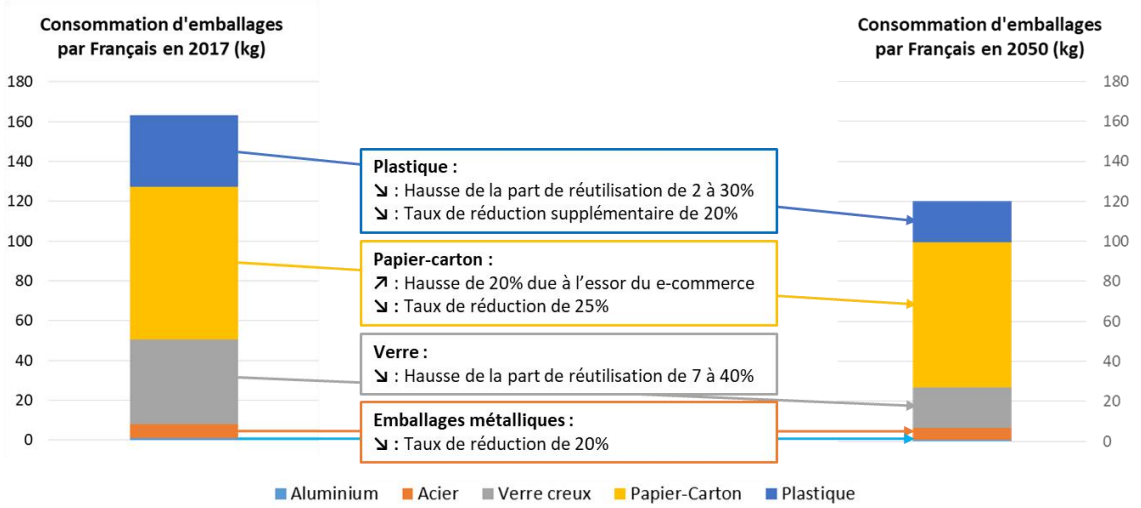
3.3.2 L'emballage

Ce secteur représente une large part des utilisations du verre, du papier-carton et du plastique, et il est également consommateur d'acier et d'aluminium sous forme d'emballages métalliques.

Ce secteur devrait connaître de profondes modifications dans les décennies à venir. La SNBC propose le développement des systèmes de vente en vrac, l'éventuelle mise en place d'une consigne sur le plastique et/ou le verre dès 2023. Début 2020, la loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire a été adoptée, fixant des objectifs de réduction des déchets à l'horizon 2030 : -15% de déchets ménagers par habitant et -5% de déchets d'activités économiques. Elle prévoit également la fin de la mise sur le marché d'emballages en plastique à usage unique d'ici à 2040.

Il est donc proposé de faire évoluer la consommation moyenne d'emballages par Français, détaillée par matériau, de la façon décrite dans le graphique suivant.

Consommation moyenne d'emballages par Français



Pour le verre, l'hypothèse est que la moitié des bouteilles en verre sont réutilisées. Puisqu'elles représentent environ 78% du verre creux produit, la part de réutilisation du verre creux est supposée atteindre 40% en 2050. Le plastique également voit son taux de réutilisation augmenter avec le développement des ventes en vrac.

Le croisement de ces hypothèses unitaires avec l'évolution de la population permet de construire la demande associée à chaque matériau pour le secteur des emballages. La démographie a un effet légèrement haussier sur cette demande, mais ne compense pas la baisse due aux efforts de sobriété.

La mise en place d'une consigne, envisagée dans la SNBC, pourrait avoir un effet important et rapide sur la consommation de verre et/ou de plastique pour les emballages. La modélisation propose une diminution régulière et plus lente de la consommation de ces matériaux au vu de l'incertitude sur les modalités et la date de mise en place d'une telle consigne.

Il est à noter également que la modélisation de la production des emballages à partir de la consommation est délicate car les flux d'imports/exports sont importants, à la fois sous forme d'emballages vides et sous forme de produits emballés.

3.3.3 Les engrais

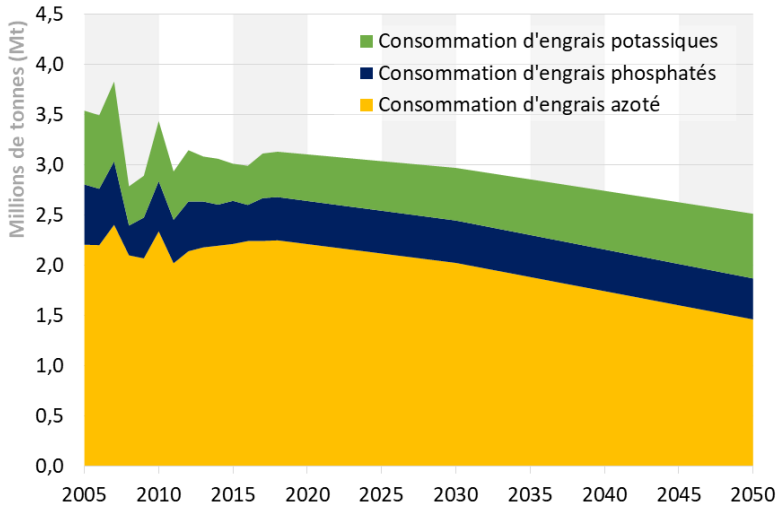
Les engrais sont des corps chimiques, organiques ou minéraux, qui apportent aux cultures des éléments nutritifs contribuant à l'augmentation du rendement et à la qualité des cultures. Les trois principaux éléments à apporter aux plantes sont l'azote (N), du phosphore (P) et de potassium (K).

L'étude s'est plutôt portée sur les engrais azotés, qui sont le principal débouché de l'ammoniac. En effet, cet élément représente la matière première de base de toute l'industrie des engrais azotés. Ces derniers sont désormais critiqués pour leur fort impact environnemental. En effet, selon CITEPA, le secteur agricole représentait 20% des émissions de gaz à effet de serre en 2014, et 40% de ces émissions sont associées à l'épandage d'engrais azotés.

La SNBC fixe pour objectif d'ici 2050 la réduction de 82% du surplus azoté, grâce à l'optimisation du cycle de l'azote. Selon l'association Solagro, ce surplus représente 40% des apports d'engrais azotés de synthèse.

Pour respecter cette ambition, la consommation d'engrais azoté devrait baisser d'au moins 35% d'ici à 2050.

Consommation d'engrais projetée



3.3.4 Le transport

Le secteur du transport recouvre lui aussi une part importante de la demande de plusieurs produits des ICGE : l'acier, l'aluminium, le plastique, le verre.

L'automobile

L'automobile est traitée dans un volet spécifique du Bilan prévisionnel et de façon un peu plus détaillée que le reste du transport. Pour modéliser les évolutions de la consommation de matériaux de ce secteur, plusieurs hypothèses sont nécessaires :

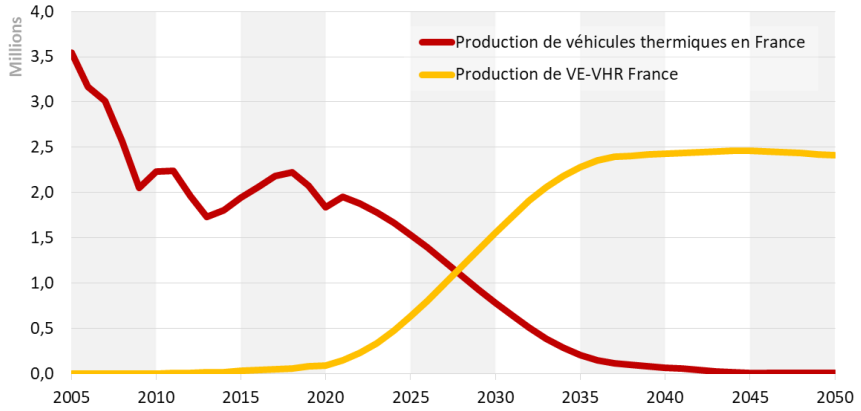
- *A propos du niveau de production automobile en France.*

La production automobile française est déduite des projections de ventes de véhicules en Union européenne et de la part de marché de la France sur ces ventes, supposée stable à 15% pour les véhicules thermiques et à 20% pour les véhicules électriques. Cette production augmente de 12% en 2050 par rapport à 2018.

- *A propos de la part de véhicules hybrides-électriques dans la production.*

La part des véhicules hybrides ou électriques dans la production française est supposée correspondre à leur part dans les ventes automobiles en France, qui permettent l'évolution du parc. Elle est de 3,6% aujourd'hui mais représentera la quasi-totalité de la production d'ici 2050.

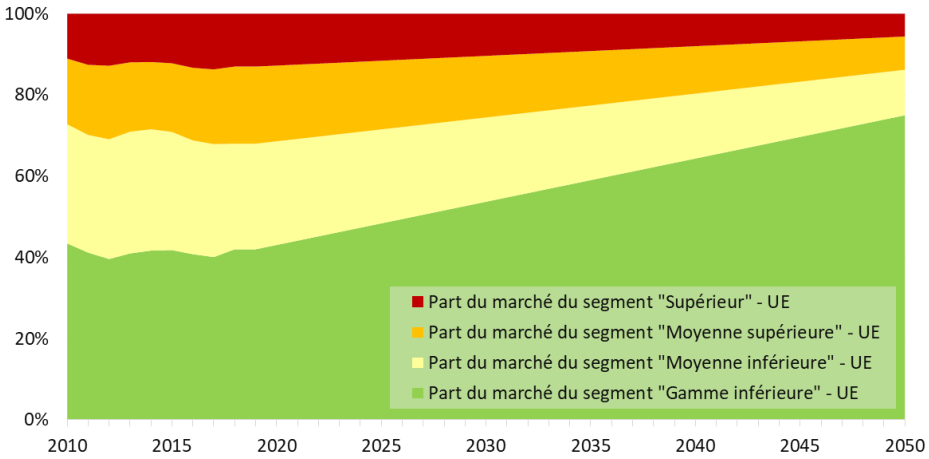
Production automobile



- *A propos de la gamme de véhicule*

La production est décomposée par gammes de véhicule, qui sont celles proposées par le Comité des constructeurs français d'automobiles (CCFA) : « Economique et inférieure », « Moyenne inférieure », « Moyenne supérieure » et « Supérieure et luxe ». Dans un contexte de sobriété, les véhicules économes et légers devraient être favorisés. La part de marché de la gamme économique, aujourd'hui de 42% pour les véhicules thermiques et de 36% pour les véhicules électriques, pourrait atteindre 75% en 2050. Ces véhicules, plus petits et plus légers, sont donc moins gourmands en matières premières et en consommation énergétique.

Structure des ventes de véhicules particuliers selon la gamme en Europe



L'analyse distingue donc 8 types de véhicules :

4 gammes x *2 catégories*

- *Economique inférieure*
- *Moyenne inférieure*
- *Moyenne supérieure*
- *Supérieure – Luxe*

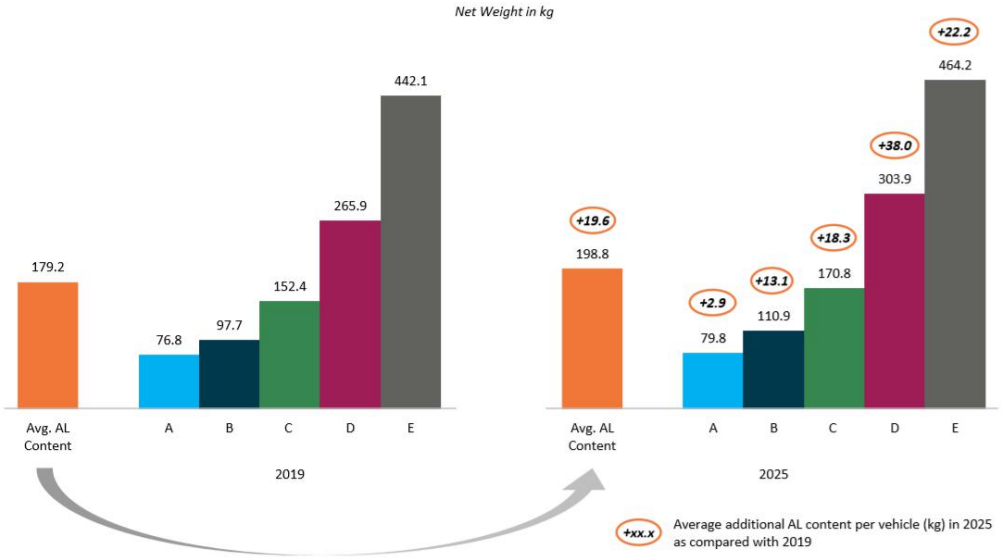
- *Véhicule électrique-hybride*
- *Véhicule thermique*

- *A propos du contenu en matériaux*

La consommation unitaire de matériaux dans la construction automobile pourrait être modifiée dans les années à venir. L'étude « *Aluminium content in European cars* » menée par Ducker Worldwide pour European Aluminium en 2012 puis en 2019 estime l'évolution du contenu en aluminium dans un véhicule européen pour les dix prochaines années. La quantité d'aluminium par véhicule pourrait selon cette étude augmenter de 30%.

Cette étude, complétée par d'autres sources pour l'acier, le verre et le plastique, permet d'associer à chaque type et gamme de véhicule une consommation d'acier, d'aluminium, de verre et de plastique. Ducker Worldwide suggère ainsi que dans un souci d'allègement des véhicules, une part d'acier sera substituée par de l'aluminium. On utilise les résultats de cette étude prospective jusqu'en 2028 en prolongeant la tendance jusqu'en 2030, puis en l'infléchissant à la baisse au-delà. La masse moyenne d'un véhicule, et donc la quantité de matériaux nécessaire à sa construction, baisse ainsi au sein de chaque gamme.

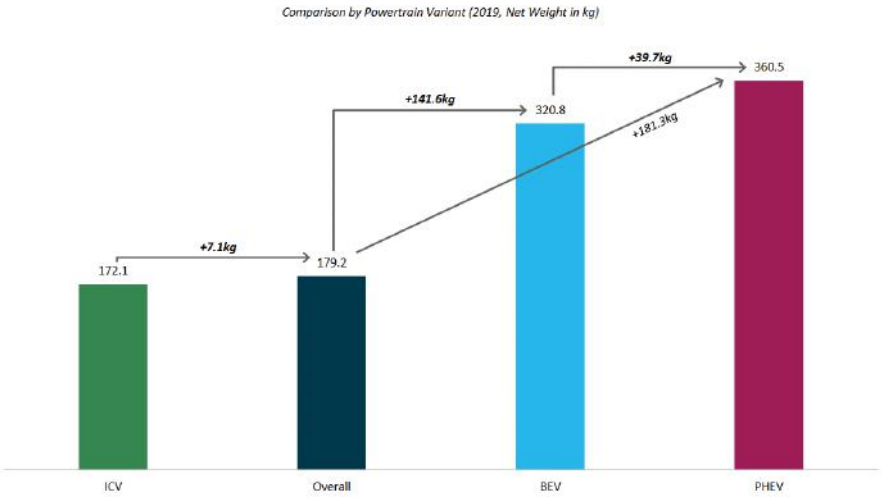
Contenu moyen d'aluminium par segment de véhicules – étude de Ducker pour European Aluminium, 2019



(*https://www.european-aluminium.eu/media/2802/aluminum-content-in-european-cars_european-aluminium_public-summary_101019-1.pdf*)

De plus, la consommation unitaire moyenne d'aluminium pour produire un véhicule électrique est largement supérieure à celle nécessaire pour un véhicule thermique : la part croissante des véhicules électriques dans la production devrait ainsi se traduire par une forte hausse de la demande d'aluminium du secteur automobile.

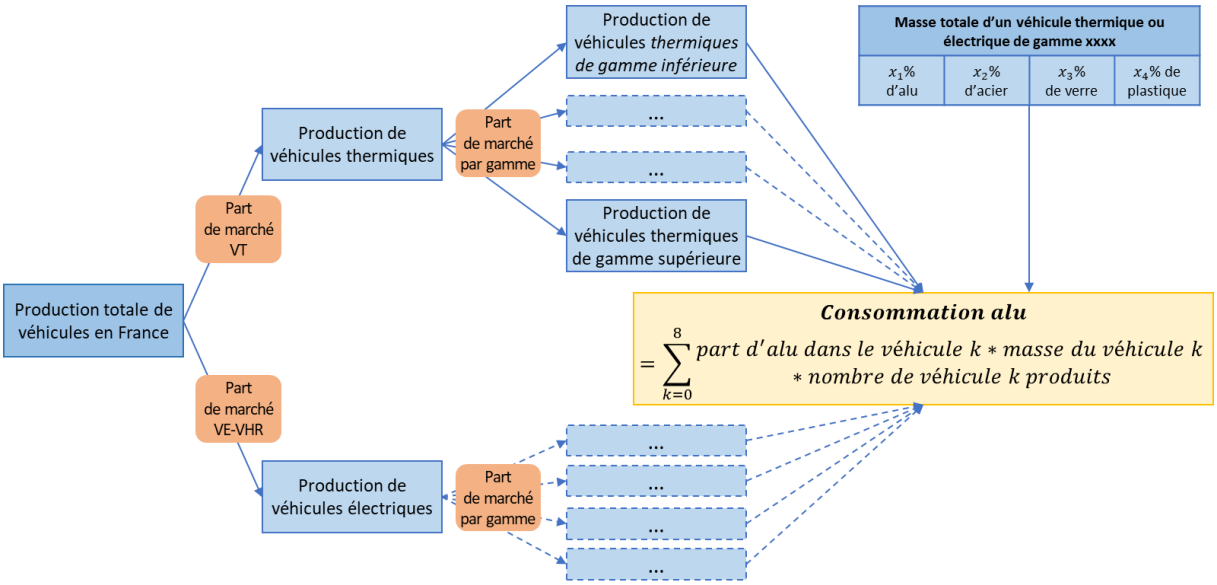
Contenu moyen d'aluminium par type de véhicule
(Internal Combustion Vehicles, Battery Electric Vehicle, Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
étude de Ducker pour European Aluminium, 2019



Sous les effets conjugués de la croissance des véhicules économiques inférieurs et de la substitution d'acier par de l'aluminium, la consommation d'acier devrait baisser en moyenne de 19% entre 2018 et 2050 pour un véhicule thermique et de 14% pour un véhicule électrique.

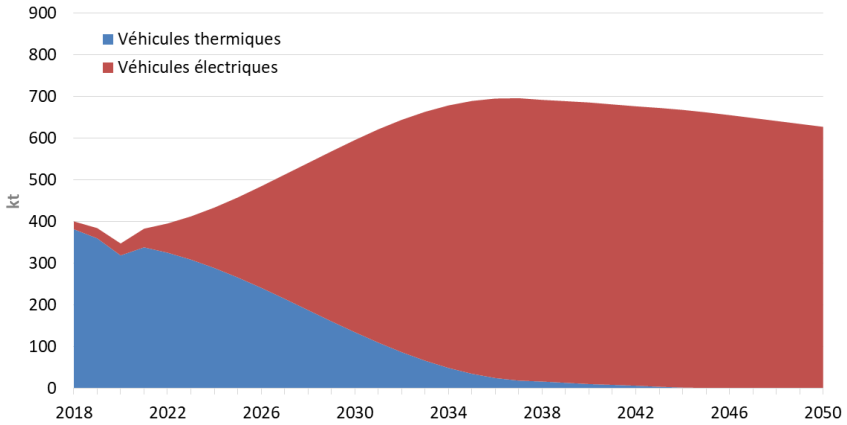
La demande d'aluminium par véhicule thermique devrait au contraire s'inscrire en hausse. Pour les véhicules électriques, la part d'aluminium est déjà élevée, les effets de substitution sont moins forts, la tendance aux petites gammes provoque plutôt une diminution de la consommation unitaire d'aluminium.

Les demandes en matériaux associées à chacun des huit types de véhicules (4 gammes x 2 types) sont multipliées par le nombre d'unités produites de ces véhicules pour obtenir la demande totale :



Au global, ces évolutions devraient se traduire par une forte hausse de la demande d'aluminium du secteur automobile.

Evolution de la demande en aluminium dans l'automobile



Le transport

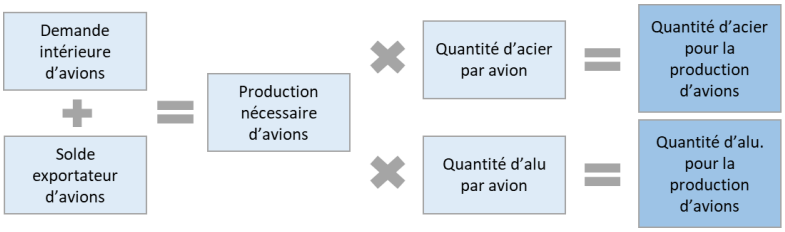
La fabrication de matériel de transport (hors construction automobile) représente également une des utilisations de l'acier, de l'aluminium, du plastique et du verre.

L'historique de production d'avions, de trains, de bateaux, de camions, etc., est issu de la base de données Eurostat *« Production vendue, exportations et importations par liste PRODCOM (NACE Rév. 2) - données annuelles »*. Ces données ont été consolidées avec celles du rapport de l'ADEME *« Transition industrielle – Prospective énergie matière : vers un outil de modélisation des niveaux de production »*, et étayés avec d'autres sources sectorielles de données.

La modélisation de la demande en matériel de transport est supposée évoluer d'ici à 2050 de façon proportionnelle au trafic de chacun des modes de transport, en cohérence avec les hypothèses affichées dans la trajectoire AMS de la SNBC. La part relative des imports ou des exports est considérée comme stable.

Grâce à une estimation de la demande en matériaux moyenne associée à la production unitaire de l'un de ces moyens de transport, il est possible de proposer une évolution de la consommation de matériaux associée au secteur du transport.

Principe de modélisation de la demande de matériaux pour la fabrication de matériels de transport
Exemple de la construction aéronautique



3.3.5 La production EnR

Les débouchés additionnels liés aux besoins de matériaux pour le développement de la production EnR (éolienne et photovoltaïque) devront être pris en compte dans la demande adressée aux filières IGCE concernées. Ces besoins étant variables selon les trajectoires de mix concernées, ils ne peuvent être fixés *a priori*. Ils dépendent aussi fortement de la localisation des sites de fabrication des équipements

de production (aujourd'hui en grande partie situés à l'étranger pour le photovoltaïque et l'éolien terrestre). A ce stade, seuls des besoins unitaires (par MW installés) en matériaux peuvent être estimés.

Il est proposé de s'appuyer sur les bilans matière de l'éolien et du photovoltaïque publiés par l'ADEME dans son rapport *« Transition industrielle - Prospective énergie matière : vers un outil de modélisation des niveaux de production »* (mai 2020).

Bilan matière de l'éolien (source ADEME)

tonnes/MW installé	Terrestre	Offshore posé	Offshore flottant
Acier	140	320	356
Aluminium	2	2	2
Verre	7	10	10
Ciment	156	378	240
Plastique	4	6	6

Bilan matière du photovoltaïque (source ADEME)

tonnes/MWc	Au sol	En toiture
Acier	105	10
Aluminium	87	43
Verre	54	68
Ciment	15	0

3.4 Estimation de la production des ICGE

A partir de l'évolution des débouchés présentés en partie 2.3, il est possible d'évaluer l'évolution de la demande en produits issus des IGCE, en considérant les éléments de cadrage socioéconomiques de la trajectoire AMS de la SNBC.

En considérant une évolution de la production des IGCE proportionnelle à celle de la demande des produits qui en sont issus, ce qui suppose un taux d'import/export invariant dans le temps, il est possible d'élaborer des premières trajectoires de production à l'horizon 2050 et de s'assurer que l'on retrouve des évolutions similaires à celles affichées dans la SNBC[5].

Lorsque des écarts seront constatés, la question pourra être soulevée de faire ou non évoluer le solde importateur/exportateur en projection pour coller au mieux aux trajectoires de production des IGCE de la trajectoire AMS/SNBC.

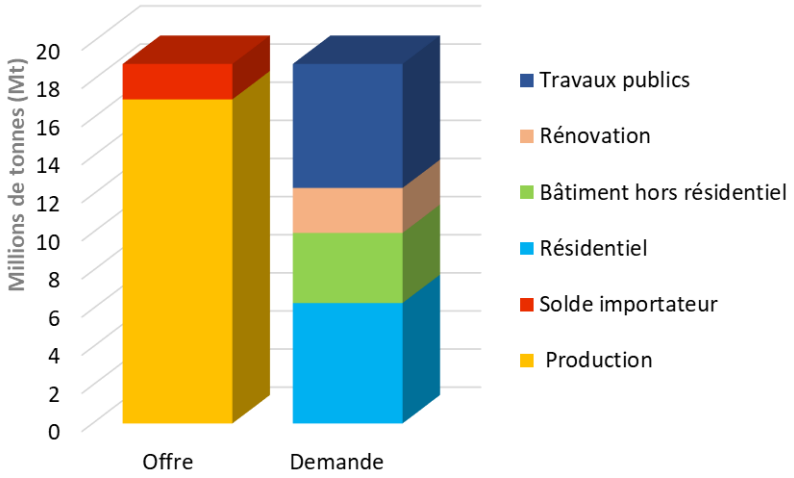
A noter également que ces trajectoires n'incluent pas à ce stade de façon explicite la demande générée par la production EnR (éolienne et photovoltaïque). L'impact unitaire (par gigawatt installé) de ce débouché est présenté en 3.3.5. Cet impact pourra être ultérieurement pris en compte plus finement selon les différentes trajectoires du mix de production.

3.4.1 Production de clinker

La production du clinker est modélisée à partir de celle du ciment, dont il est le principal constituant. La production de ciment en France représente environ 90% de la demande nationale annuelle, laissant ainsi apparaître un solde net importateur de 1,9 Mt en 2018.

Le secteur de la construction constitue naturellement l'unique débouché pour la production de ciment, réparti entre travaux publics (35% des tonnages), construction résidentielle (33%), construction de bâtiments hors résidentiel (19%) et travaux de rénovation (13%).

Offre et demande de ciment en 2018

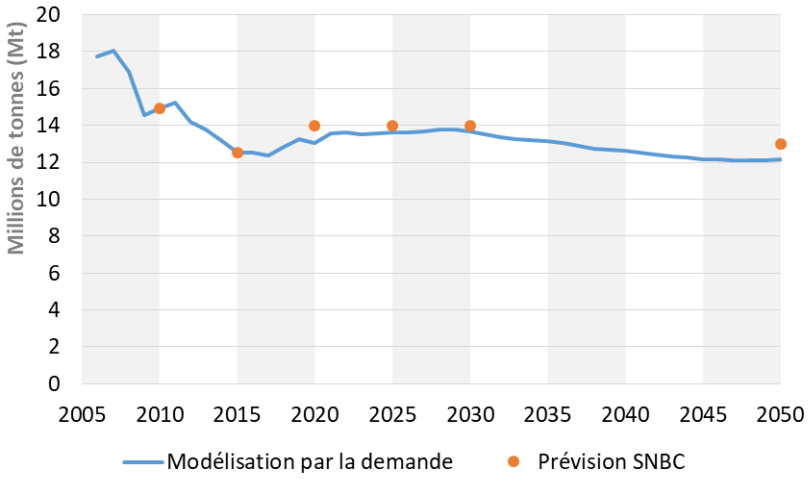


[5] *On s'appuie pour ce faire sur les trajectoires de production en quantités physiques des IGCE présentées lors du GT « Industrie – déchets – gaz fluorés » de préparation de la SNBC du 28 avril 2018. Les données de la sidérurgie, visiblement surévaluées, ont été recalées sur les statistiques de la World Steel Association, en conservant la trajectoire de la SNBC.*

L'évolution des débouchés de la construction est présentée en partie 2.3, avec une croissance des travaux publics tirée à la hausse par le contexte économique, une baisse de la construction de bâtiments neufs, partiellement compensée par un fort accroissement des rénovations. A ces évolutions s'ajoutent en outre une baisse de la teneur en clinker du ciment et une moindre consommation unitaire de ciment dans la construction (recours à des matériaux biosourcés).

Avec ces hypothèses et l'évolution des débouchés de construction, la trajectoire de production de clinker en France, modélisée homothétiquement à l'évolution de la demande intérieure de clinker, serait relativement proche de celle décrite dans la trajectoire AMS de la SNBC.

Production de clinker

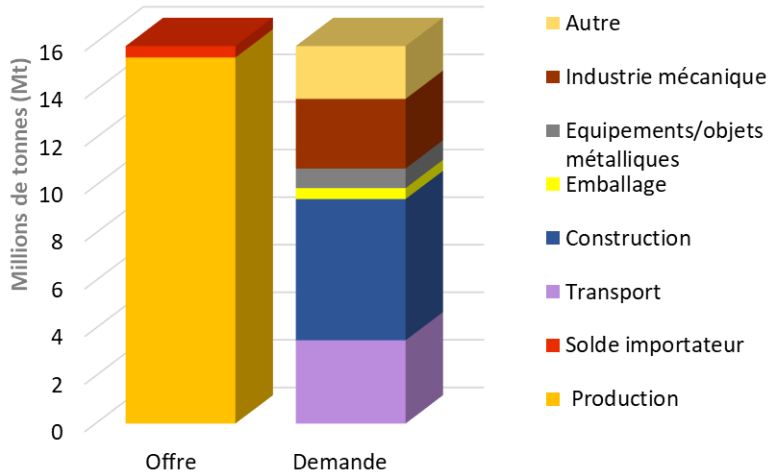


3.4.2 Production d'acier

De façon très globale, la production française d'acier couvre quasiment, à 97%, la demande nationale annuelle. Cette vision globale masque toutefois des volumes d'imports et d'exports très importants. Ainsi, la France dispose d'une production d'acier plat importante, mais doit importer 40 % de la consommation française de produits longs.

Le secteur de la construction (37%), la construction de matériel de transport (22%) et la construction mécanique (18%) constituent les principaux débouchés pour l'acier consommé en France.

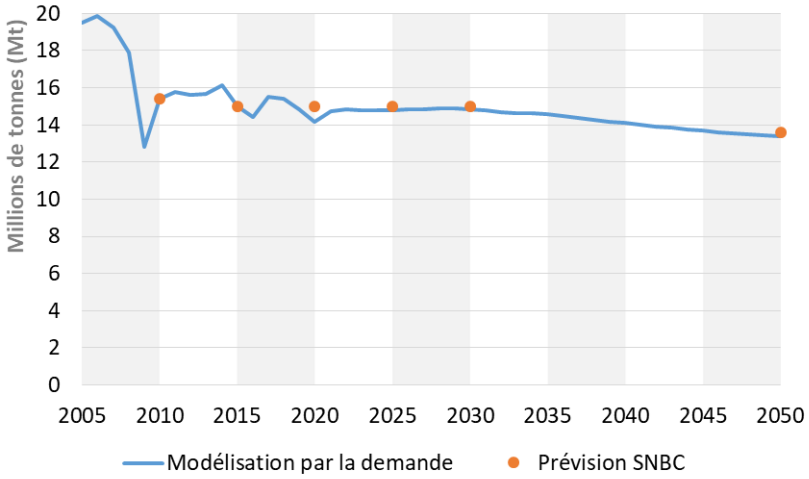
Offre et demande d'acier en 2018



L'évolution des débouchés de l'acier, présentée en partie 2.3, est notamment marquée par une consommation unitaire en baisse dans la construction automobile (véhicules plus légers et recours accru à l'aluminium en lieu et place de l'acier), dans la construction (recours à des matériaux biosourcés) dans les emballages, pendant que les autres débouchés (transport hors automobile, industrie mécanique, biens métalliques) restent légèrement croissants.

Cela se traduirait, avec les hypothèses socioéconomiques sous-jacentes de la trajectoire AMS, par une baisse de la demande intérieure d'acier de 11% environ à l'horizon 2050, en cohérence avec la trajectoire de production retenue dans la SNBC. Cette baisse résulte d'une contraction de 18% de la demande pour l'automobile et de 20% celle de la construction à l'horizon 2050, baisse qui n'est pas partiellement contrebalancée par l'évolution des autres débouchés.

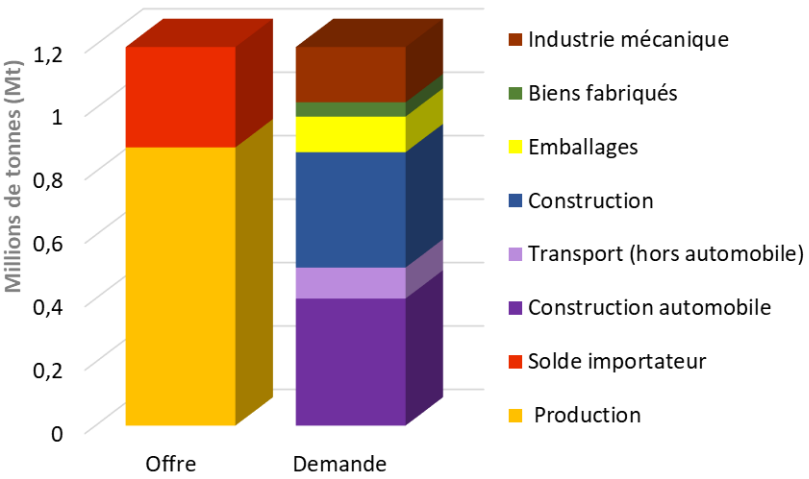
Production d'acier



3.4.3 Production d'aluminium

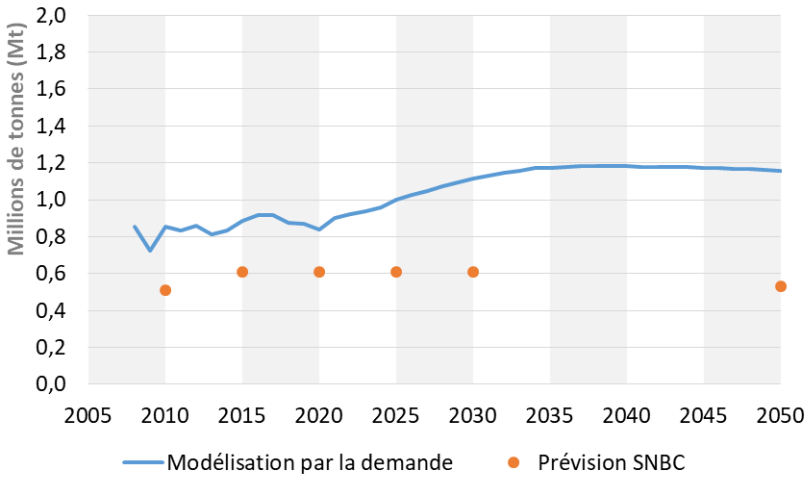
La production française d'aluminium n'a couvert en 2018 que 73% de la consommation intérieure. Les débouchés de l'aluminium concernent essentiellement le transport (42%, dont 34% pour le seul secteur de la construction automobile) et la construction (30%).

Offre et demande d'aluminium en 2018



L'évolution des débouchés de l'aluminium, présentée en partie 2.3, se traduit par un effet haussier, lié à la hausse d'activité mais également à un recours accru à ce matériau lié à ses caractéristiques physiques, à savoir de bonnes performances mécaniques couplées à une relative légèreté. L'utilisation de l'aluminium est donc appelée à croître, notamment dans le secteur du transport (remplacement d'une partie de l'acier dans les véhicules) et de la construction. Avec les éléments de cadrage de la trajectoire AMS, la demande d'aluminium en France croîtrait de 22% environ entre 2018 et 2050. Plus de 70% de cette hausse serait due au seul secteur du transport.

Production d'aluminium



Finalement, cette évolution de la demande conduirait à une production (sous l'hypothèse d'une évolution homothétique) en écart marqué par rapport à la trajectoire de production de la SNBC :

- d'une part en raison d'un niveau de calage historique de la production physique assez différent (plus de 30% d'écart), et que l'analyse de différentes sources de données ne permet pas d'expliquer ;
- d'autre part du fait de dynamiques opposées : baisse de 13% dans la SNBC et hausse de 22% dans la modélisation par la demande, entre 2018 et 2050.

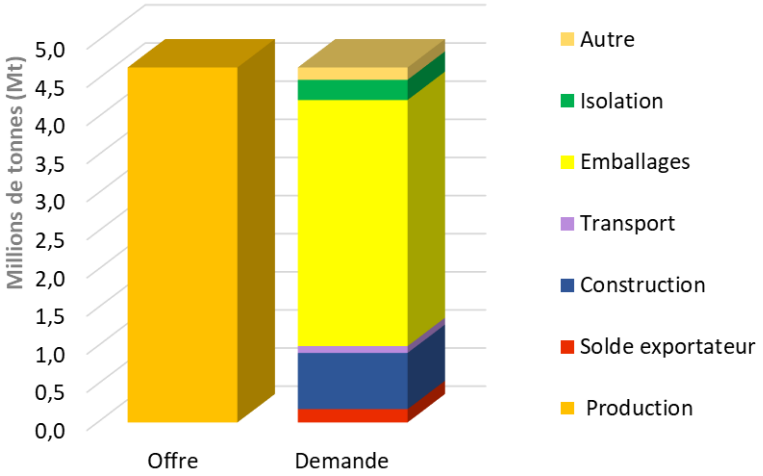
Cette ICGE soulève la question du choix entre :

- considérer une production qui évolue en cohérence avec la demande intérieure de matériau, en considérant donc implicitement un poids relatif du solde importateur constant et, dans le cas présent, une augmentation significative des capacités de production en France ;
- se caler sur la trajectoire SNBC, ce qui signifie un maintien des capacités de production à un niveau relativement constant et une hausse du solde importateur.

3.4.4 Production de verre

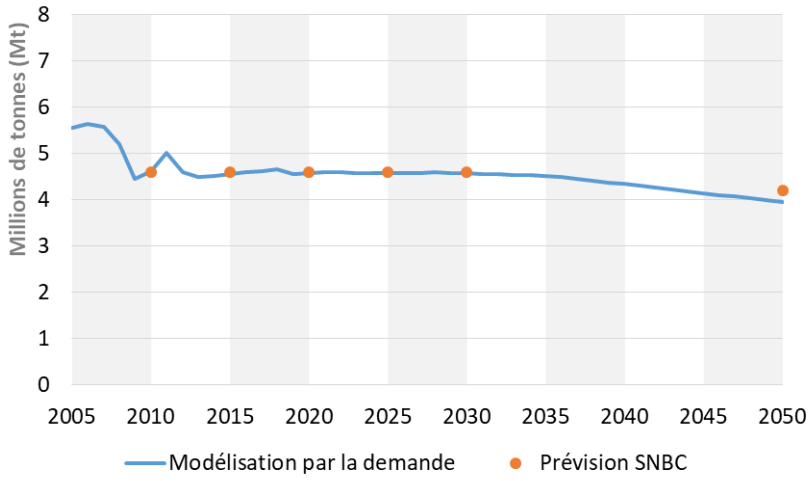
La production de verre en France est globalement exportatrice, avec un solde net de plus de 170 Mt en 2018. La production de verre trouve son principal débouché, à plus de 70%, dans les emballages (bouteilles, flacons…), devant le secteur de la construction et de la rénovation.

Offre et demande de verre en 2018



La mise en place d'une consigne sur le verre creux, évoquée dans la SNBC, est bien évidemment de nature à affecter significativement la production de verre creux en France : avec les hypothèses présentées en partie 2.3, le verre creux, qui représente environ 71% des quantités de verre consommées annuellement en France, n'en représenterait plus que 60% en 2050. Au global, malgré quelques produits fortement orientés à la hausse (comme la laine de verre, du fait du fort niveau de rénovation des bâtiments), la consommation totale de produits verriers, après une relative stagnation d'ici à 2030, s'infléchirait légèrement à la baisse et se contracterait de 15%.

Production de verre

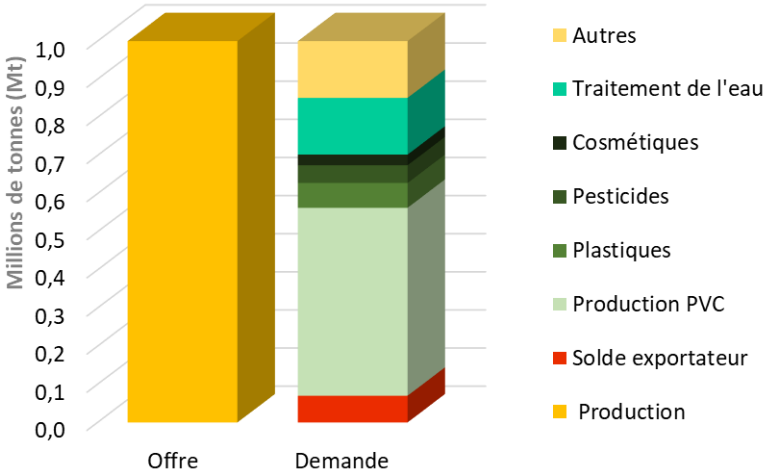


Cette évolution de la demande conduirait à une production (sous l'hypothèse d'une évolution proportionnelle) proche de celle proposée dans la trajectoire AMS de la SNBC.

3.4.5 Production de chlore

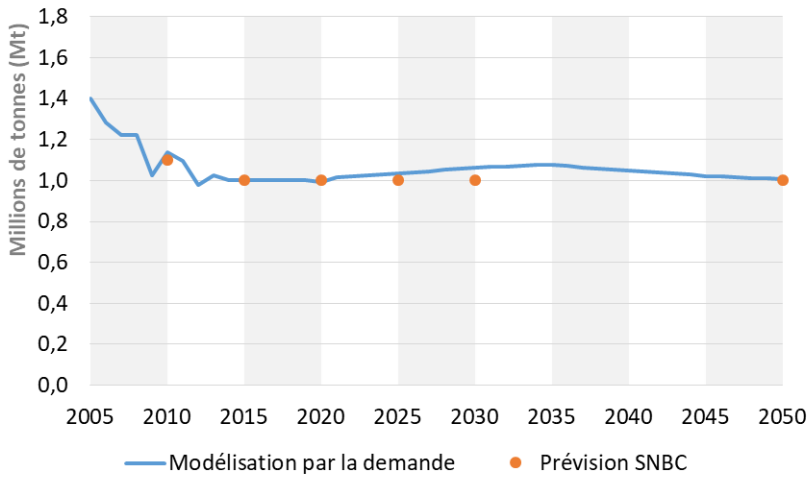
La production de chlore en France est légèrement excédentaire : le solde exportateur net s'est élevé en 2018 à environ 7% de la production. Un des principaux débouchés du chlore est la production de PVC (53% des débouchés en 2018).

Offre et demande de chlore en 2018



A terme (cf. partie 2.3), la réduction de l'usage des pesticides et des plastiques est de nature à réduire sensiblement la consommation de chlore pour ces usages. Cette baisse marquée est de nature à contrebalancer la très légère hausse des autres débouchés, d'où une consommation relativement stable sur tout l'horizon prévisionnel.

Production de chlore

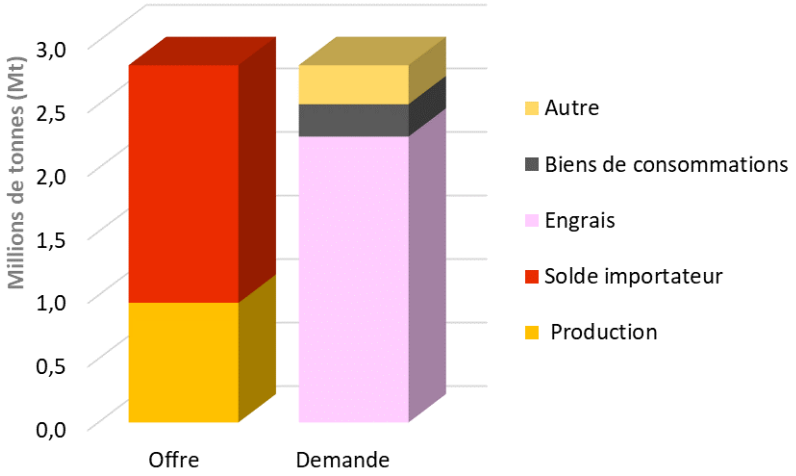


Cette relative stabilité, appliquée à la production, rejoint celle affichée par la trajectoire AMS de la SNBC.

3.4.6 Production d'ammoniac

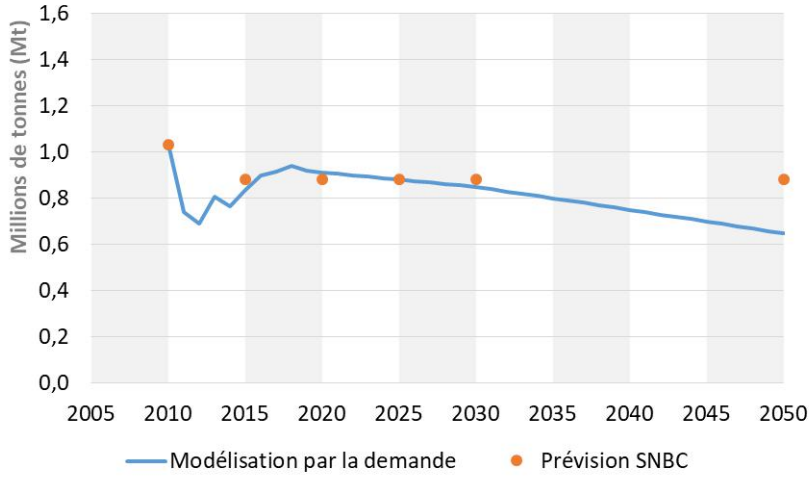
La France est fortement importatrice d'ammoniac : la production intérieure n'a couvert, en 2018, qu'un tiers des besoins en ce produit. L'ammoniac est très essentiellement destiné (à 80%) à la production d'engrais azotés.

Offre et demande d'ammoniac en 2018



Le recours aux engrais azotés étant appelés à être réduit pour atteindre les objectifs de la SNBC (cf. partie 2.3), la demande en ammoniac pourrait naturellement se contracter elle-même.

Production d'ammoniac

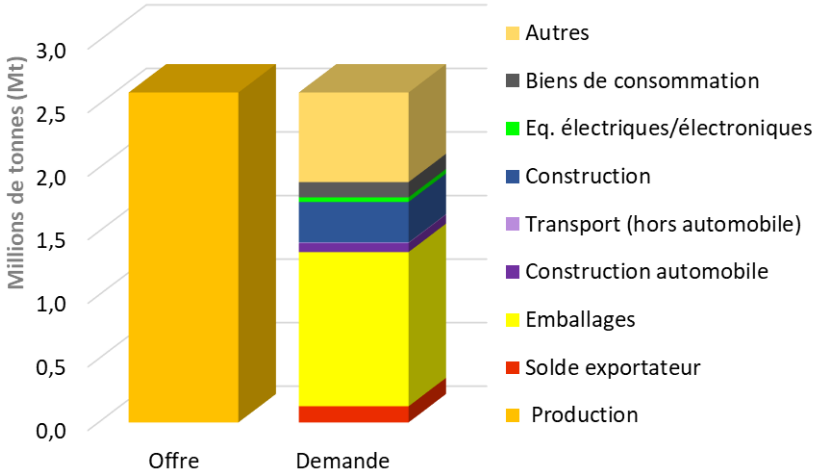


Appliquée à l'historique de production d'ammoniac, cette tendance baissière place la trajectoire de production à un niveau sensiblement plus bas que les projections de la SNBC, ce qui soulèvera la question des hypothèses sur l'évolution du solde importateur. En effet, il est également possible que la baisse de la demande en engrais azotés n'ait que peu d'effets sur la production d'ammoniac en France et ne se répercute finalement que sur les imports.

3.4.7 Production d'éthylène

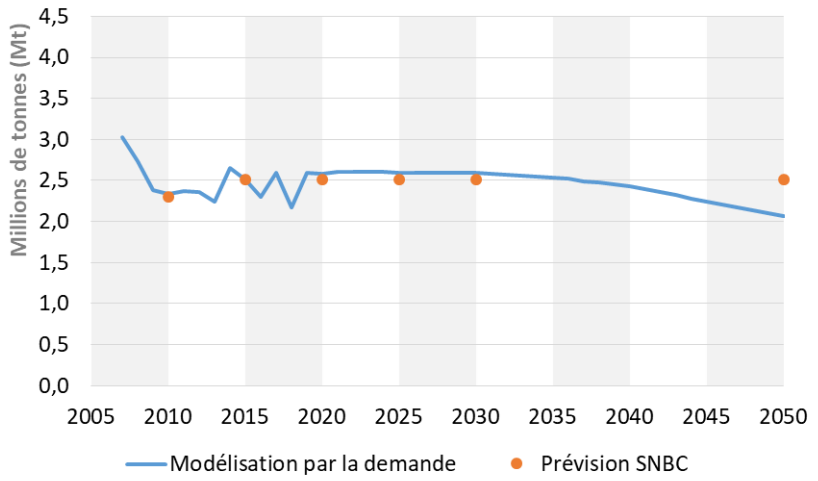
La production d'éthylène en France a été excédentaire en 2018, avec un solde exportateur net représentant près de 5% de la production. Le principal débouché de l'éthylène demeure le secteur de l'emballage, qui représente près de la moitié de son usage.

Offre et demande d'éthylène en 2018



Avec la montée des préoccupations environnementales et la volonté politique de réduire l'utilisation des matières plastiques, la demande en éthylène est appelée à se réduire progressivement, avec un tonnage destiné à l'emballage qui devrait être réduit de 36% d'ici à 2050. L'évolution des autres débouchés est toutefois de nature à compenser partiellement cette baisse, avec en corollaire une demande totale en éthylène en baisse de 21% en 2050 par rapport à 2018.

Production d'éthylène

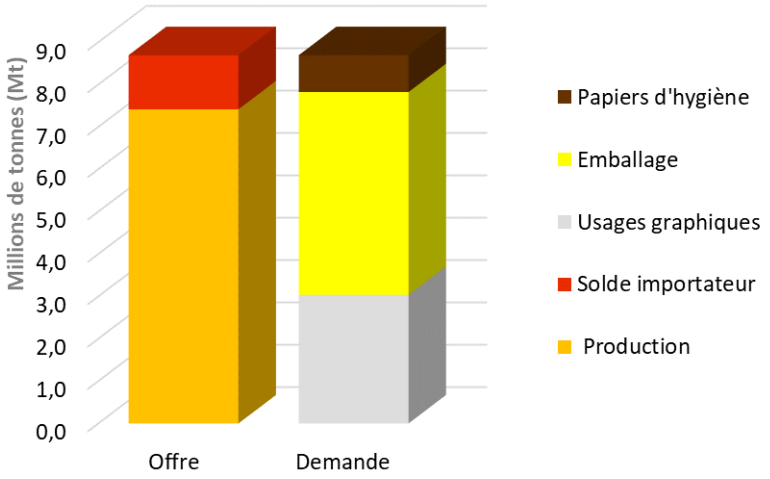


Cette évolution baissière de la demande s'écarte de la parfaite stabilité affichée pour la production d'éthylène en France dans la SNBC, laissant le champ ouvert à différentes hypothèses sur l'évolution du solde exportateur.

3.4.8 Production de papier-carton

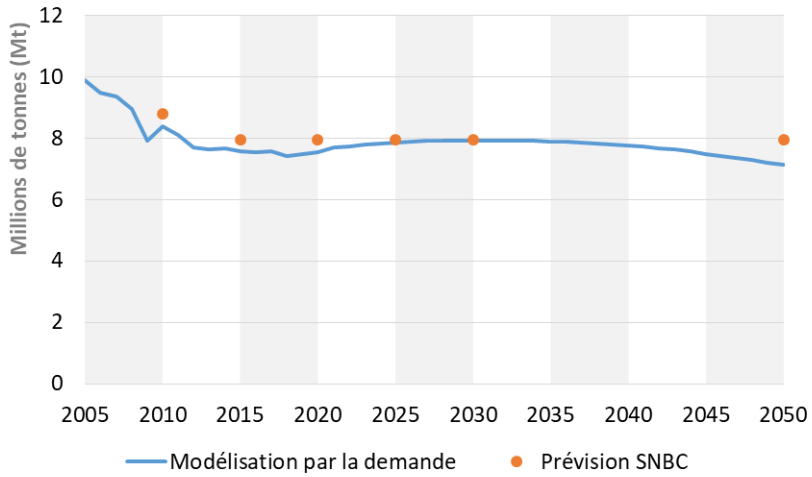
La production française de papier-carton (hors pâte à papier) ne couvre pas l'ensemble des besoins annuels du pays, puisque près de 15% de la demande en papier-carton a été satisfaite par des importations. Les débouchés se répartissent en trois grands types d'usages : l'emballage (55% des débouchés), les usages graphiques (35%) et les usages pour l'hygiène (10%).

Offre et demande de papier-carton en 2018



L'évolution de ces débouchés, détaillée en partie 2.3, est marquée par une baisse des usages graphiques (concurrence du numérique notamment), contrebalancée par le développement de l'usage « emballages » (en lien avec l'essor du e-commerce et la réduction des emballages en matière plastique). Dans l'ensemble, la demande en papier-carton devrait être légèrement croissante jusqu'en 2030 avant d'entamer une inflexion baissière (-4% environ en 2050 par rapport à 2018).

Production de papier-carton (hors pâte à papier)

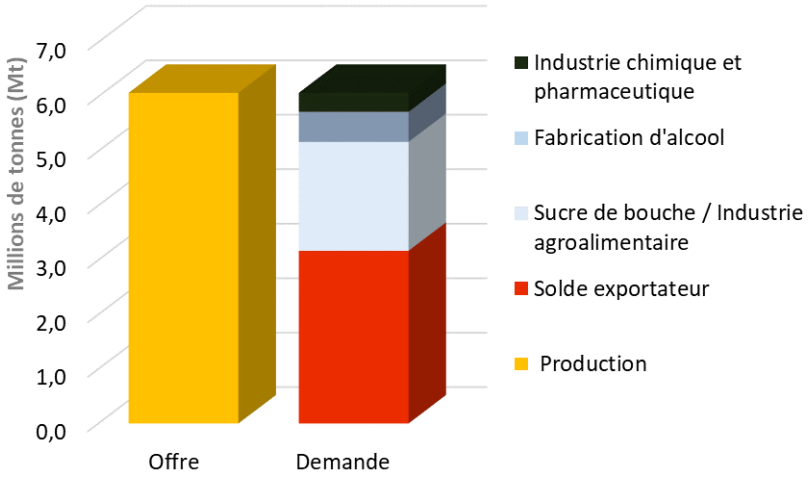


Appliquée à la production, cette dynamique se traduirait par une trajectoire de production relativement proche, quoique légèrement inférieure en 2050, de celle de la trajectoire AMS de la SNBC.

3.4.9 Production de sucre

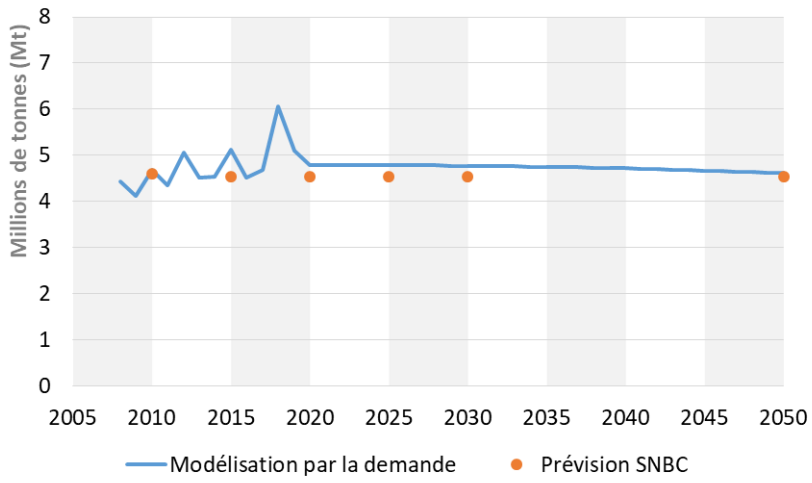
L'industrie sucrière française est très largement excédentaire, puisque plus de la moitié de sa production est exportée. Sa production est marquée par une variabilité assez forte, liée à celle des récoltes de betteraves. L'essentiel (88% en 2018) de la demande de sucre en France concerne l'industrie agroalimentaire et le sucre de bouche (69%) ou la fabrication d'alcool (19%).

Offre et demande de sucre en 2018



L'évolution de la demande en sucre va donc être fortement corrélée à l'évolution démographique, en prenant toutefois en compte une réduction tendancielle de la consommation de sucre par personne (75 g journaliers par personne en 2050 contre 85 g aujourd'hui), qui contrebalance l'effet de la croissance de la population.

Production de sucre



Cette dynamique, appliquée à la production sucrière, se traduirait par une trajectoire proche de celle retenue dans la trajectoire AMS de la SNBC.

3.5 Approche pour l'industrie diffuse

3.5.1 Evolution de la valeur ajoutée

Comme expliqué en 2.1, le cadrage macroéconomique de la SNBC se traduit par une hausse de plus 40% de la valeur ajoutée de l'industrie entre 2019 et 2050. La SNBC ne fournit en revanche pas plus d'indications à propos des secteurs qui seront porteurs de ce dynamisme.

Le niveau de production des IGCE a été étudié grâce à une approche physique sur les grandes filières de production énergivores, ce qui n'est pas envisageable pour l'industrie diffuse qui recouvre de nombreux produits différents. L'approche se fera donc en valeur ajoutée plutôt qu'en quantités physiques.

Une première approche avait été proposée lors de la précédente réunion du groupe de travail en septembre 2020, visant à répartir la valeur ajoutée industrielle « résiduelle », à savoir la valeur ajoutée cible défalquée de celle projetée pour les IGCE, sur les NCE de l'industrie diffuse, afin d'assurer un bouclage macroéconomique cohérent avec les éléments de cadrage de la SNBC. Cette première approche comportait toutefois une forte part d'empirisme et pouvait conduire à faire porter l'essentiel de la croissance de la valeur ajoutée par un nombre réduit de NCE, au détriment du réalisme de la projection.

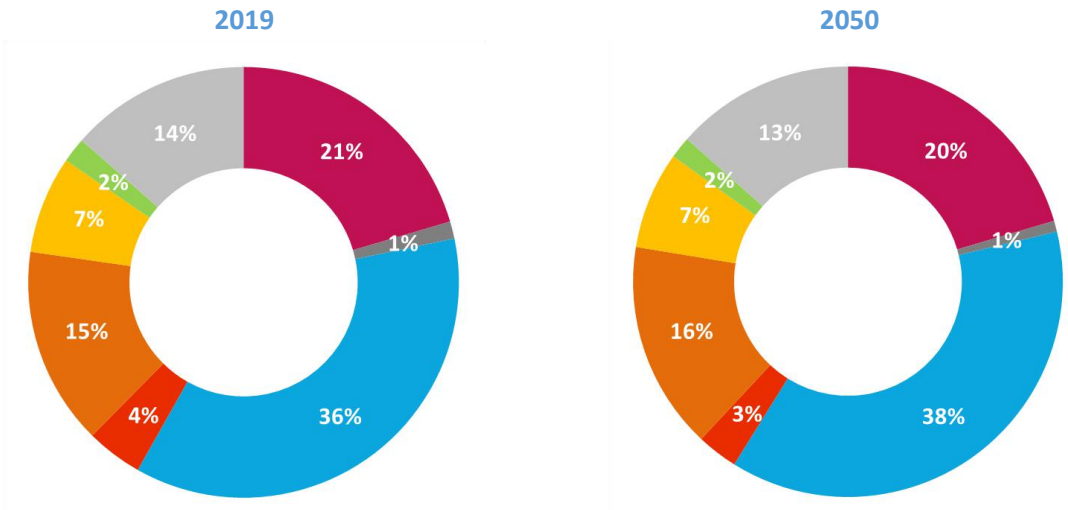
Des travaux ont depuis été entrepris afin d'améliorer sensiblement cette approche. Pour construire un scénario de référence cohérent avec l'évolution du PIB décrite par la SNBC, la méthode désormais retenue propose de s'appuyer sur les tableaux entrées-sorties de la comptabilité nationale.

A partir de ces tableaux entrées-sorties, des hypothèses sur l'évolution de la demande permettent de calculer comment l'offre y répond. Cette méthode est détaillée dans le second document de concertation diffusé conjointement à celui-ci et portant sur les variantes de réindustrialisation.

Cette approche permet ainsi de projeter l'évolution de la valeur ajoutée industrielle pour chaque NCE, tout en assurant un bouclage macroéconomique crédible et cohérent.

La figure ci-dessous illustre l'évolution de la répartition de la valeur ajoutée à l'horizon 2050 à la maille des grands regroupements de NCE.

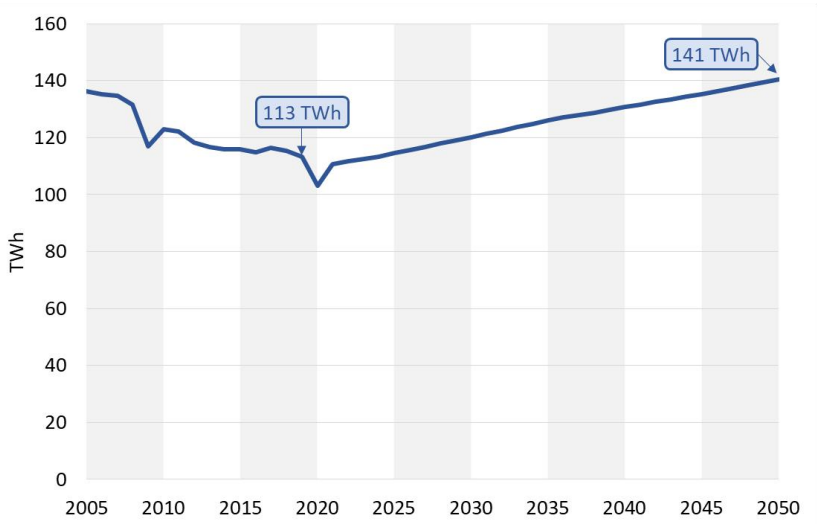
Répartition de la valeur ajoutée industrielle



3.5.2 Effets volume et structure sur la consommation électrique de l'industrie

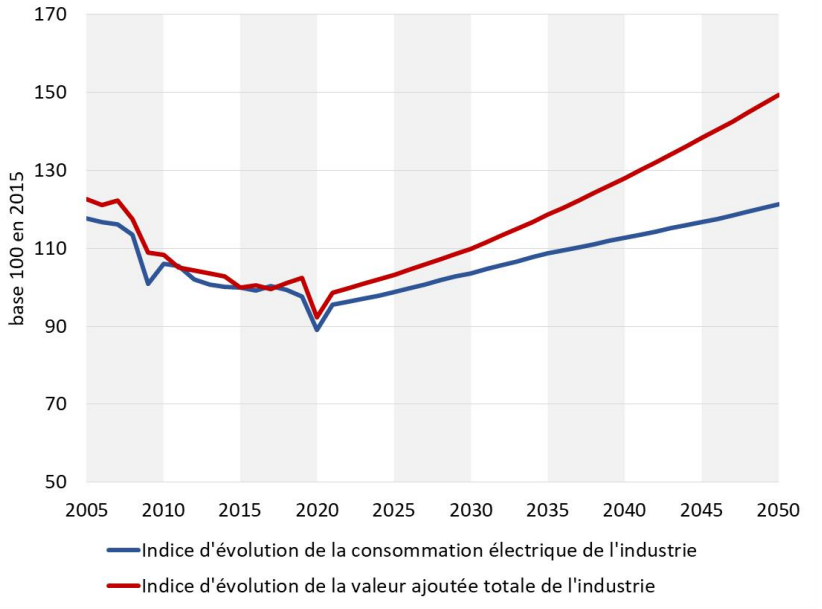
En figeant à sa valeur actuelle la consommation électrique par unité de valeur ajoutée pour chaque NCE (ou par quantité physique pour les ICGE), il est possible d'estimer l'impact de l'évolution de l'activité productrice projetée sur la consommation électrique de l'industrie, sans aucune prise en compte des autres effets (qui feront l'objet de travaux ultérieurs) : économies d'énergie, électrification, taux de recyclage, etc.

Effet « volume global » sur la consommation d'électricité de l'industrie
(autres effets non pris en compte à ce stade)



La comparaison de l'évolution de la valeur ajoutée de l'industrie (telle que présentée précédemment, sans inclure à ce stade les besoins de matériaux induits par la production EnR) et de celle de la consommation électrique sous le seul effet « volume » induit (sans prendre en compte donc les autres effets) permet de constater que ce dernier est moins haussier que la valeur ajoutée.

Comparaison de l'évolution de la valeur ajoutée projetée
et de son effet « volume » sur la consommation d'électricité dans l'industrie



Ce phénomène s'explique aisément par le fait que le dynamisme de l'industrie est essentiellement porté par des branches industrielles diffuses et sensiblement moins énergivores que les IGCE. L'effet de structure qui en résulte tend donc à modérer l'impact haussier de la croissance de l'activité productrice sur la consommation d'électricité.

L'effet haussier global de 27,4 TWh sur la consommation peut donc être décomposé en deux effets :

- un effet « volume » global, représentant l'effet haussier sur la consommation électrique d'une croissance de l'activité globale, assimilée à la valeur ajoutée de l'industrie, appliquée de façon homogène sur toutes les NCE ;
- un effet de « structure », équivalent à l'écart entre l'effet « volume » global et la somme des effets « volume » estimés pour chaque NCE en lui appliquant la croissance d'activité de cette NCE (et non celle de la valeur ajoutée industrielle globale).

Ces effets s'élèvent à +51,7 TWh pour l'effet « volume » et à -24,3 TWh pour l'effet « structure ».

3.6 Impact du recyclage

A l'horizon 2050, la production de certaines IGCE pourrait intégrer une plus grande part de matières premières issues du recyclage (MPR). La SNBC propose ainsi des objectifs ambitieux à l'horizon 2050. Or la production à partir de matières recyclées peut impliquer des procédés différents, ou rendre un procédé moins énergivore. De plus, l'augmentation du recyclage du plastique va modifier la demande en éthylène, ainsi qu'en chlore très utilisé pour la fabrication du PVC. Le développement significatif du recyclage pourrait donc avoir un impact sur la consommation énergétique de l'industrie.

Les hypothèses de taux d'incorporation des MPR ont été établies en cohérence avec celles de la SNBC, en s'assurant que la quantité de matières premières à recycler incorporée dans la production demeure bien inférieure au potentiel de récupération de ces matières premières sur une année.

Les principales hypothèses retenues sont résumées dans le tableau suivant.

Taux d'incorporation de matières premières issues du recyclage à l'horizon 2050

	2019	2050
Acier	40%	80%
Aluminium	56%	70%
Verre	61%	80%
Papier-carton	62%	70%
Plastiques (polyéthylène, PVC, polystyrène)	3%	30%

Pour chaque matériau, une intensité électrique de la production à partir de matières premières vierges et une intensité de la production à partir de matières premières recyclées sont ensuite utilisées pour estimer l'impact du recyclage sur la consommation[6].

[6] *A l'exception des matières plastiques pour lesquelles on considère que l'effet du recyclage porte sur la réduction de la demande en éthylène, ainsi qu'en chlore (très utilisé pour la fabrication du PVC)*

Pour l'acier, les procédés sont très différents. L'acier primaire est fabriqué à partir de minerai de fer dans les hauts-fourneaux, très gourmands en combustibles mais relativement peu consommateurs d'électricité. L'acier secondaire au contraire est produit dans des aciéries électriques, à partir de ferrailles fondues, avec une consommation d'électricité par tonne produite de 10 à 15 fois supérieure à celle de la filière haut-fourneau. Un développement du recyclage de l'acier s'accompagne donc d'une baisse de la consommation de combustibles mais d'une hausse de l'intensité électrique.

Le procédé de fabrication de l'aluminium primaire est quant à lui déjà principalement électrique, et très énergivore. D'après le Groupement des affineurs d'aluminium, « affiner ou recycler de l'aluminium permet l'économie de 95% d'énergie par rapport à l'aluminium primaire ». La consommation électrique associée à la production d'aluminium est donc extrêmement sensible à l'hypothèse sur la part d'aluminium issue du recyclage.

La production d'une tonne de pâte à papier recyclée consomme environ 60% moins d'électricité que celle d'une tonne de pâte à papier fabriquée à partir de bois.

Pour le verre, le procédé de fabrication va rester le même, et c'est la part de calcin (verre recyclé) que l'on incorpore qui permet quelques économies d'énergie, de l'ordre de 3% lorsqu'on incorpore 10% de matières premières recyclées supplémentaires (FEVE - The European Container Glass Federation).

L'effet global de l'augmentation du taux de recyclage sur la consommation d'électricité à l'horizon 2050 peut sembler modeste (cf. tableau ci-dessous). Il résulte toutefois d'effets plus importants, la hausse associée au recyclage de l'acier étant contrebalancée par la baisse provoquée par le développement de l'affinage de l'aluminium.

Impact de l'évolution du taux de recyclage sur la consommation électrique à l'horizon 2050

en TWh	Acier	Aluminium	Autres	**Total**
Impact sur la consommation électrique	+3,5	-2,5	-0,2	**+0,8**

3.7 Impact de l'efficacité énergétique

Les effets haussiers liés à la croissance de l'activité productrice devraient être partiellement contrebalancés par la poursuite de la progression de l'efficacité énergétique, catalysée en particulier par les règlements d'écoconception, dont celui portant sur les moteurs électriques qui représentent plus des deux tiers de la consommation d'électricité dans l'industrie (cf. encadré).

Ecoconception des moteurs électriques

Pour diminuer l'impact énergétique des moteurs (dont la consommation d'électricité est estimée à 36% de celle de l'Union européenne), en application de la directive écoconception, les moteurs à faible rendement énergétique ne peuvent plus être mis sur le marché depuis le 1er janvier 2017.

En effet, les moteurs à induction à cage d'une puissance comprise entre 0,75 et 375 kW doivent désormais avoir au minimum une classe de rendement Premium (IE3) ou une classe de rendement Haut (IE2) s'ils sont équipés d'un variateur de vitesse.

Les moteurs de classe de rendement Standard (IE1), et Haut (IE2) sans variateur de vitesse, ne peuvent ainsi plus être mis sur le marché.

La Commission européenne estime à environ 10% le gain à l'horizon 2030 sur la consommation du parc de moteurs concernés par la réglementation. La plage de puissance des moteurs concernés par la réglementation pourrait prochainement être élargie.

Source : https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/eia_overview_report_2017_-_v20171222.pdf

Les gisements portent sur deux types d'usages :

- le gisement d'économie d'énergie dans les opérations transverses de l'industrie (production d'air comprimé, de froid, pompage, ventilation, force motrice, éclairage…), estimé par le CEREN[7];
- le gisement sur les usages de procédés, estimé également par le CEREN[8].

L'estimation du gisement d'économie d'énergie dans les opérations transverses de l'industrie a été réalisée en considérant dix types d'opérations.

Trois concernent essentiellement les combustibles : les pertes de production de fluides caloporteurs (pertes chaufferies), les pertes de transport et distribution de fluides caloporteurs (pertes réseaux), le chauffage des locaux.

Sept autres opérations portent exclusivement sur l'électricité : les pertes dans les transformateurs électriques, l'éclairage, les moteurs électriques, la production d'air comprimé, la production de froid, la ventilation, le pompage.

Les évaluations s'appuient sur la base de données du CEREN sur l'industrie, comptant plus de 5000 usines consommant plus de 200 tep par an, pour lesquelles des informations très détaillées comme les caractéristiques techniques et économiques des équipements énergétiques sont disponibles. Cette base de données est complétée par la base de données « moteurs » du CEREN (440 usines enquêtées), par les enquêtes annuelles sur les ventes d'équipements thermiques et par des fiches techniques émanant de différents acteurs.

Des données externes au CEREN sont également utilisées, comme les enquêtes des ministères de l'Industrie et de l'Agriculture EACEI (enquêtes obligatoires réalisées par correspondance auprès d'un nombre élevé d'industriels), les informations obtenues dans des revues de presse spécialisées, les fiches d'opérations standards CEE (certificats d'économie d'énergie) et les projets de fiche non encore validés, etc.

[7] *Rapport « Le gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses de l'industrie »*

[8] *Rapports « le gisement d'économies d'énergie dans la petite industrie » ; « le gisement d'économies d'énergie dans les industries intermédiaires » ; « le gisement d'économies d'énergie dans l'industrie lourde »*

Enfin, ces sources de données sont complétées par une enquête téléphonique auprès d'un échantillon d'industriels et par des entretiens réalisés auprès des organismes professionnels ou entreprises.

Les actions d'économie d'énergie analysées par le CEREN sont celles ayant fait l'objet d'au moins une réalisation industrielle, en France ou à l'étranger, afin de garantir la crédibilité d'un développement opérationnel de celles-ci.

Sur la base du taux de pénétration actuel de chaque action d'économie énergie identifiée, de son champ et du gain énergétique qu'elle apporte, le CEREN fournit dans son étude une estimation détaillée des gisements techniques d'économie d'énergie, par procédé transverse et par NCE. Certaines actions d'économie d'énergie portant sur un même procédé, les gisements bruts ne sont pas entièrement additifs, et le CEREN évalue le gisement d'économie d'énergie sommable, de l'ordre de 34 TWh, ainsi qu'une estimation des temps de retour sur investissement.

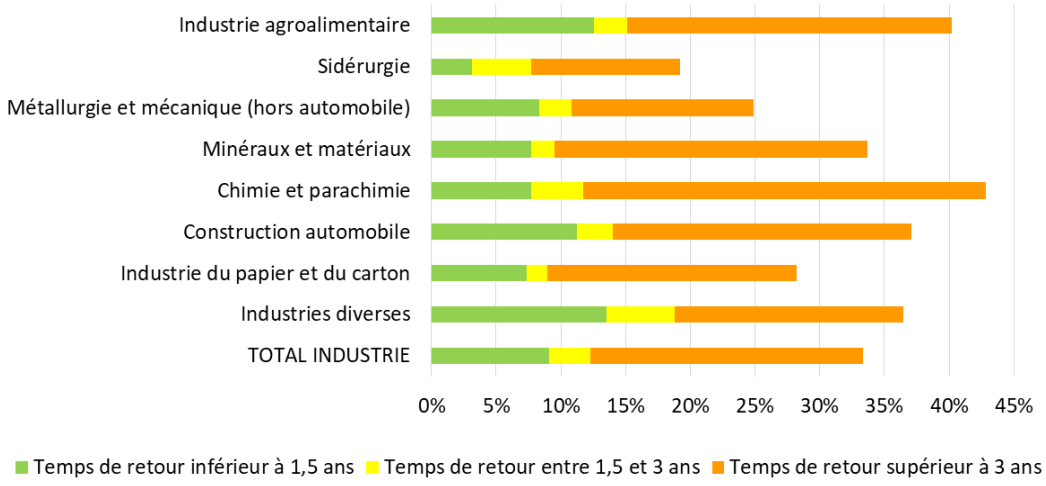
De même que pour les opérations transverses, les économies d'électricité atteignables sur les opérations de procédés ont fait l'objet d'évaluations de la part du CEREN dans des rapports annuels balayant les différentes branches de l'industrie.

L'approche est identique à celle utilisée pour les usages transverses, mais porte sur les opérations de procédés *stricto sensu*, déjà industrialisées.

Le gisement technique d'économie d'électricité (détaillé par action et par NCE dans le rapport du CEREN) s'élève à 6 TWh environ (hors économies liées au recyclage).

La compilation de ces gisements, sur usages transverses et sur procédés, permet d'estimer le gisement technique total d'économie d'électricité dans l'industrie, classé selon différentes classes de temps de retour (cf. figure ci-dessous).

Estimation du gisement d'économie d'électricité (en %) dans l'industrie



A l'horizon 2050, l'hypothèse proposée est que l'intégralité du gisement à temps de retour court ou moyen est réalisée, et que la moitié du gisement à temps de retour long (plus incertain donc) émerge. Ces hypothèses permettent d'estimer l'impact de l'amélioration de l'efficacité énergétique sur la consommation électrique à l'horizon 2050 : il atteindrait environ 32 TWh.

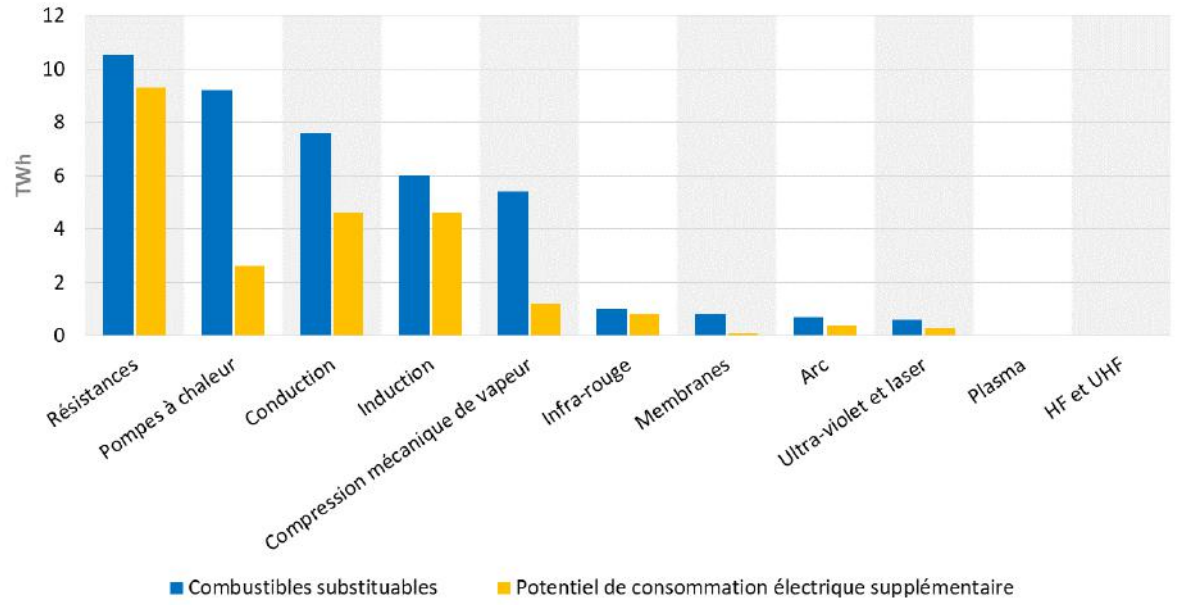
3.8 Impact de l'électrification des procédés

Comme le souligne la SNBC, l'électricité est une énergie très peu carbonée en France et constitue donc un vecteur énergétique privilégié de la transition énergétique, appelé à se substituer à la consommation de combustibles fossiles lorsque cela est techniquement possible. Les trajectoires de la SNBC intègrent ainsi un taux d'électrification d'environ 70% pour les consommations énergétiques du secteur industriel à l'horizon 2050, le reste de la consommation d'énergie étant assuré par d'autres combustibles décarbonés (biomasse, biogaz voire biocarburants).

Pour estimer les volumes substituables, une étude du CEREN a été utilisée[9]. Cette étude repose sur la base de données industrielle détaillée précédemment évoquée, portant sur les consommations de l'année 2014. Pour l'évaluation du gisement substituable, une technique électrique est retenue si elle représente plus de 1 % de la consommation du segment dans la tranche de puissance considérée (hors pompes à chaleur, traitées ultérieurement). Dans ce cas, on considère qu'elle peut se généraliser au sein de la NCE, mais seulement dans la tranche de puissance dans laquelle elle a été observée. Si plusieurs techniques électriques sont présentes, c'est la plus performante qui est retenue, de façon à obtenir un gisement sommable.

Sous ces hypothèses, en dehors de toute considération économique, 18% de la consommation de combustibles pour les procédés thermiques, soit 41,6 TWh, sont substituables par des techniques électriques. En privilégiant les techniques électriques les plus performantes actuellement, l'ensemble de ces substitutions conduirait à une consommation électrique supplémentaire de 23,9 TWh, essentiellement sur les techniques résistives, la conduction et l'induction.

Combustibles substituables par technique électrique et consommation électrique supplémentaire

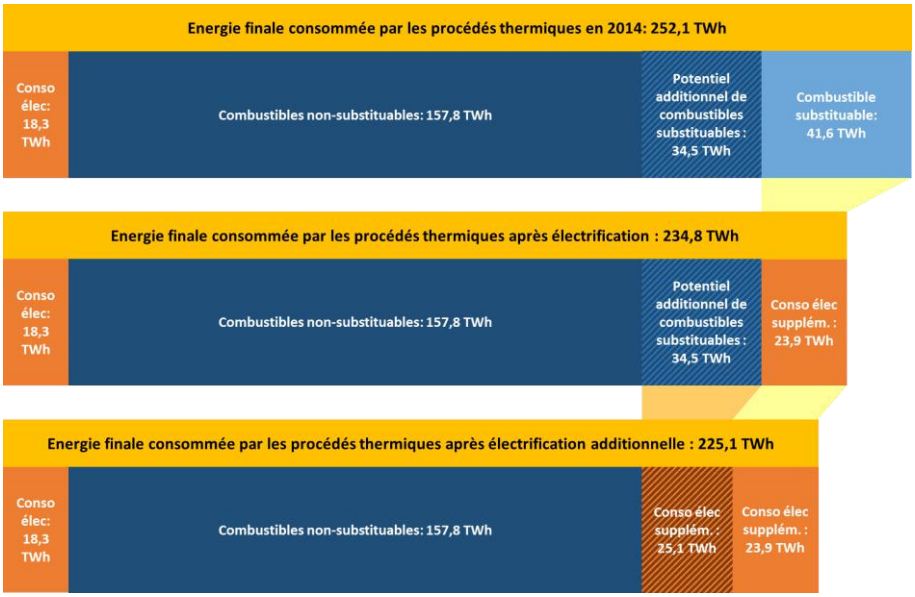


Un potentiel additionnel est également estimé, correspondant aux combustibles substituables supplémentaires si la technique observée au sein d'une NCE est généralisée sur tout le segment même

[9] *« Première analyse du potentiel technique d'électrification des procédés industriels thermiques par des technologies matures »*

si elle n'a pas été observée dans certaines tranches de puissance. Ce potentiel pourrait se traduire par une consommation additionnelle d'électricité de 25,1 TWh.

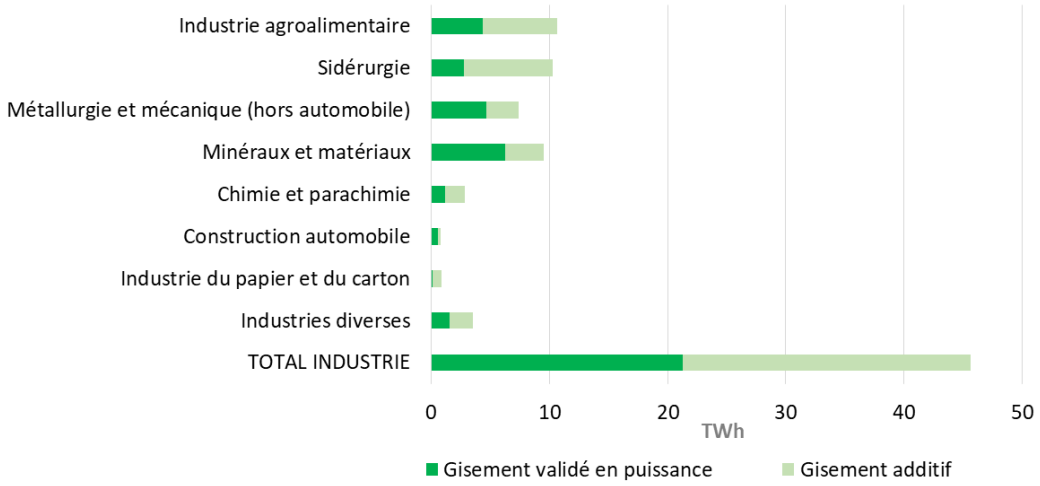
Evaluation du potentiel d'électrification validé en puissance et du potentiel d'électrification additionnel proposée par le CEREN



Dans un premier temps, les pompes à chaleur (PAC) ont été isolées de ce potentiel (les PAC industrielles sont traitées ultérieurement dans ce document).

Le potentiel résultant par grandes branches est représenté sur la figure suivante.

Estimation du potentiel technique d'électrification dans l'industrie (hors pompes à chaleur et chaudières électriques)



De même que pour l'efficacité énergétique, des hypothèses sur la part du gisement technique réalisée d'ici à 2050 ont été retenues : on considère ainsi que l'intégralité du gisement « validé en puissance » aura été réalisé à cet horizon, et 50% du gisement additionnel.

Au global, selon ces hypothèses, l'électrification des procédés industriel génèrerait une consommation électrique additionnelle de plus de 38 TWh en 2050, avec à la clé une contraction de 57 TWh environ de la consommation de combustibles (dont 22 TWh de consommation sous chaudière).

Par ailleurs, la sidérurgie, fortement émettrice de gaz à effet de serre, présente la particularité d'être particulièrement difficile à décarboner. Pour atteindre les objectifs de neutralité carbone, les émissions de ce secteur à forte intensité énergétique devront pourtant être réduites significativement. Une étude du Fraunhofer Institute[10] détaille les technologies prometteuses à faibles émissions, qui pourraient conduire à une décarbonation en profondeur de la production industrielle d'ici 2050.

Pour l'acier, sur un horizon de long terme, les deux options les plus prometteuses à l'étude sont la réduction directe à l'hydrogène (procédé HYBRIT) ou l'électrolyse du minerai de fer (procédé SIDERWIN). Ces deux options peuvent être absolument libres de toutes émissions si l'électricité utilisée est complétement décarbonée. La réduction directe à l'hydrogène représente 4% de la production dans le monde, avec de l'hydrogène fourni par des combustibles fossiles. Elle n'est pour l'instant pas développée en France mais pourrait devenir intéressante en 2050 avec de l'hydrogène issu d'électrolyseurs.

Quelques caractéristiques des options de décarbonation du secteur de la sidérurgie

Technology option	Examples	TRL	Max. emissions reductions [11]	Energy savings [12]	Market entry	Reference Technology
Hydrogen based direct reduction (H2-DR)	HYBRIT, GrINHy, H2Future, SuSteel, SALCOS	7	up to 95%	20%	2030/2035	BF/BOF steelmaking
Electrolysis of iron ore	SIDERWIN, ULCOWIN	6	up to 95%	40%	2040	BF/BOF steelmaking
Smelting reduction (without CCS)[13]	Hisarna	5[14]-6	up to 35%	20%	2025[e]	BF/BOF steelmaking
Top gas recycling blast furnace (without CCS)[15]	ULCOS-BF, IGAR	7	up to 25%	15%	2025+	Blast furnace

Source : Fraunhofer Institute

Il est difficile de prévoir laquelle de ces options pourrait être mise en œuvre. Dans la trajectoire de référence, l'hypothèse retenue, conformément aux propositions du groupe de travail « interfaces entre l'électricité et les autres vecteurs », est celle de l'émergence à parts égales de ces deux filières décarbonées (la filière HYBRIT est en revanche la seule retenue dans la variante « hydrogène + »).

Compte tenu du caractère encore expérimental de la filière SIDERWIN, on considère qu'elle n'émergera à un niveau industriel qu'à partir de 2040. A plus court terme, la réduction directe (DRI) et/ou la séquestration et le stockage de carbone sont des voies de nature à permettre à la filière sidérurgique de tenir ses engagements de réduction d'émissions de CO_2 à 2030.

[10] *Fraunhofer Institute (Yeen Chan, Laurent Petithuguenin, Tobias Fleiter, Andrea Herbst, Marlene), «Industrial Innovation | Part 1: Technology Analysis,» 2019.*

Plusieurs sources ont été comparées pour évaluer l'intensité électrique du procédé SIDERWIN, qui devrait entraîner une forte surconsommation d'électricité. Au final, l'effet retenu à 2050 est de plus de 6 TWh supplémentaires d'électricité.

3.9 Impact de l'électrification des besoins de chaleur

Une approche similaire, basée sur la même étude du CEREN, a été utilisée pour estimer le potentiel d'électrification des besoins de chaleur par l'utilisation de pompes à chaleur industrielles. Le potentiel identifié dans l'étude pour des besoins de chaleur inférieurs à 100°C a été extrapolé aux besoins de chaleurs allant jusqu'à 150°C. En effet, une veille technologique montre que les PAC peuvent déjà atteindre des températures largement supérieures à 100°C et pourraient constituer à terme une solution pour des usages allant jusqu'à cette température de 150 °C.

La consommation potentielle de combustibles ou de vapeur substituable par des PAC serait ainsi de 18,5 TWh (dont 13,5 validés en puissance), avec en corollaire une consommation électrique additionnelle de 5,3 TWh (dont 3,9 TWh validés en puissance).

Sous les mêmes hypothèses de réalisation du gisement que pour les procédés (100% du gisement « validé en puissance » et 50% du gisement additionnel), cela représenterait une consommation électrique supplémentaire de 4,4 TWh en 2050 (en substitution à 16 TWh de combustibles environ).

Enfin, la consommation résiduelle de combustibles sous chaudière (besoins de chaleur supérieurs à 150°C) à l'horizon 2050 a été estimée, en prenant en compte l'ensemble des différents effets sur cette consommation (effets « volume », « structure », « efficacité énergétique », « électrification »…).

La décarbonation de cette consommation (d'environ 34 TWh) pourra passer par différentes solutions : un recours accru à la biomasse, à la filière hydrogène et/ou aux chaudières électriques. Ces dernières présentent de nombreux avantages techniques (modulation de la puissance de chauffe, maintenance réduite, etc.) mais sont encore peu présentes dans le parc de chaudières industrielles (0,2 TWh de consommation environ) en raison du coût relatif de l'électricité. Leur compétitivité par rapport aux chaudières au gaz devrait toutefois s'améliorer avec l'augmentation du prix du CO_2 et les objectifs de décarbonation.

Le parc de chaudières industrielles est globalement assez ancien : 30% environ de sa consommation énergétique est le fait d'installations ayant plus de 35 ans d'âge. Le déploiement de solutions décarbonées devra donc être favorisé à l'horizon des prochaines années lors du renouvellement de ce parc ancien.

On considère (comme cela a été évoqué dans le groupe de travail « hydrogène ») un panachage des différentes filières pour décarboner cette production de chaleur. Avec une hypothèse de 70% passant par la solution des chaudières électriques, une consommation supplémentaire de 26 TWh émergerait à l'horizon 2050, en substitution de plus de 28 TWh de combustibles.

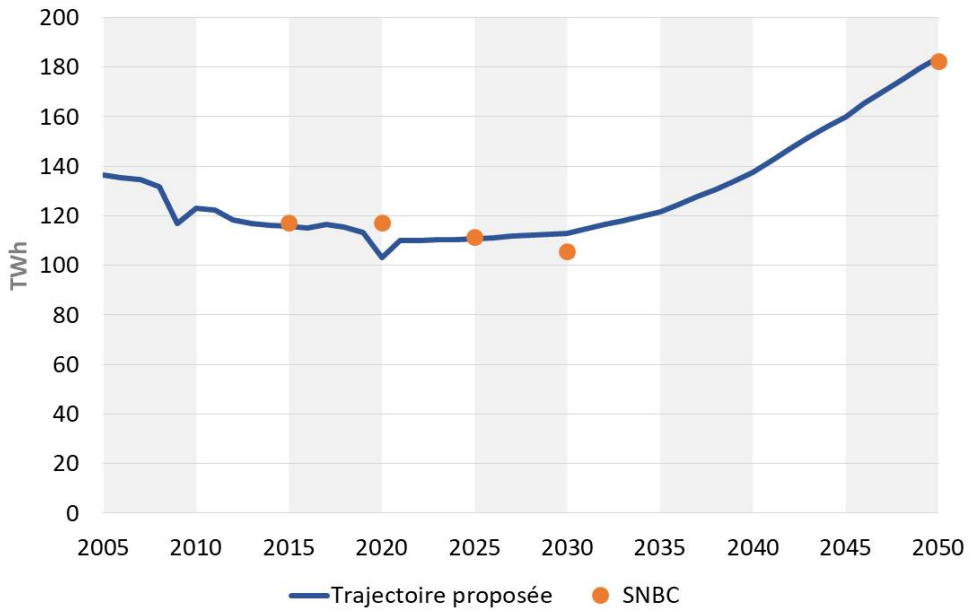
3.10 Synthèse des consommations du secteur industriel

Au global, dans un cadre cohérent avec celui de la SNBC, la consommation d'électricité devrait s'infléchir puis s'orienter vers une forte hausse à l'horizon 2050, sous l'effet prégnant de l'électrification des consommations énergétiques de l'industrie, catalysée par la transition énergétique.

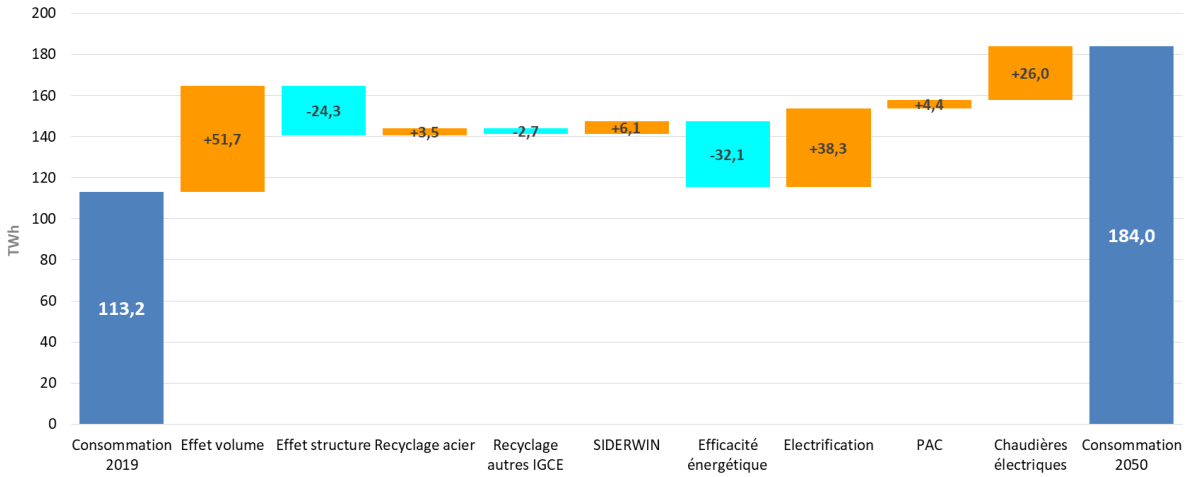
Évolution de la consommation par grandes branches dans le secteur industriel (TWh)

	2019	**2050**
Industrie agroalimentaire	20,6	41,2
Sidérurgie	11,0	25,4
Métallurgie et mécanique (hors automobile)	24,4	35,3
Minéraux et matériaux	9,4	15,5
Chimie et parachimie	20,8	27,8
Construction automobile	5,3	6,1
Industrie du papier et du carton	7,3	11,8
Industries diverses	12,9	19,2
Non réparti	1,5	1,5
Total industrie	**113,2**	**184,0**

Trajectoire de consommation d'électricité du secteur industriel



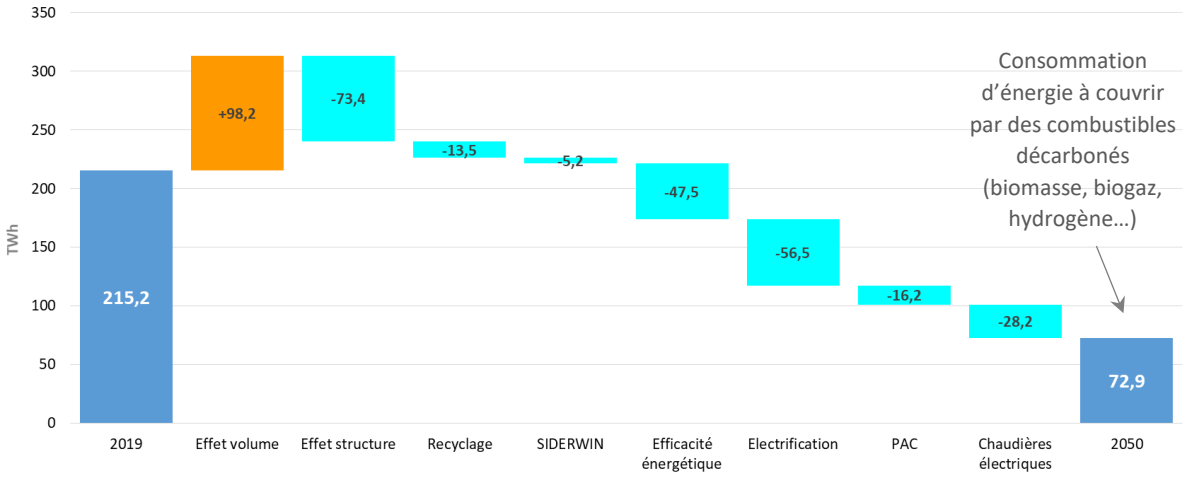
Décomposition en effets de l'évolution de la consommation d'électricité du secteur industriel entre 2019 et 2050



Le volume résiduel de consommation de combustibles fossiles devant être décarbonée d'ici 2050 a été estimé avec une approche similaire.

Hors usage matière première, cette consommation restant à décarboner, après prise en compte des effets précédemment décrits, se réduirait à 73 TWh environ, dont 12 TWh environ de consommation sous chaudière (cf. graphique ci-après).

Décomposition en effets de l'évolution de la consommation de combustibles (hors matière première) du secteur industriel entre 2019 et 2050



Conformément aux orientations de la trajectoire AMS de la SNBC, la décarbonation de ce solde passera essentiellement par un recours accru à de la biomasse solide, du gaz renouvelable, voire des biocarburants. L'hydrogène pourrait également contribuer à la décarbonation des consommations résiduelles sous chaudière et d'une partie de la sidérurgie (cf. groupe de travail « interfaces entre l'électricité et les autres vecteurs »).

Au-delà de cette trajectoire cohérente avec les orientations de la SNBC, des trajectoires alternatives sont envisageables (comme une trajectoire « hydrogène + » faisant plus fortement appel au vecteur hydrogène). Celles-ci feront l'objet de variantes ou d'analyses ultérieures.